Міністерство освіти і науки України
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка
Навчально-науковий інститут інформаційних
технологій та механотроніки
Кафедра технології машинобудування

Є.А. ФРОЛОВ, С.І. КРАВЧЕНКО,
С.В. ПОПОВ, С.М. ГНІТЬКО

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Монографія

Полтава, 2019 р.

УДК 621.8:621.7:621.9:658.512
ББК 34.5

Рекомендовано до друку Вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол №8 від 30 листопада 2018 р.)

Рецензенти:

В.В. Драгобецький – д.т.н., проф., завідувач кафедрою технології машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського;

О.А. Пермяков – д.т.н., проф., завідувач кафедрою технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

М.К. Резніченко – д.т.н., проф., завідувач кафедрою інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва Української інженерно-педагогічної академії

Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування / Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. Полтава, 2019. 204 с.

ISBN 978-617-7319-20-6

У монографії комплексно викладено найбільш важливі аспекти і положення, пов’язані з виявленням спадковості при обробленні деталей та складанні вузлів виробів машинобудування, що впливають на їх експлуатаційні характеристики. Представлено фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів, що спадкуються, їх геометричні параметри, що утворюються під час технологічних процесів. Запропоновано методики управління якістю продукції машинобудівних підприємств на стадіях конструювання та виробництва.

Рекомендується для наукових робітників, інженерно-технічних робітників, які займаються створенням та експлуатацією виробів у галузі машинобудування, а також студентів вищих навчальних закладів механічних спеціальностей галузі знань «Механічна інженерія».

УДК 621.8:621.7:621.9:658.512
ББК 34.5

ISBN 978-617-7319-20-6

ЗМІСТ

ВСТУП

Основним завданням різних галузей машинобудування України в сучасних умовах є створення конкурентної продукції підвищеної якості й надійності.

Технологічне керування – один з основних методів підвищення якості виробів машинобудування, ефективніший, ніж конструктивні рішення й надійна експлуатація.

Формування властивостей виробів відбувається не тільки на фінішних операціях технологічного процесу, але і протягом нього. Кожна виробнича похибка у своєму складі має відповідну частку від виготовлення матеріалу на стадії металургії від заготівельного виробництва, механічної обробки різанням, складання і т. д. Ефект спадкування помітний тим більше, чим вищі показники точності виробів. При низькій точності спадкоємні похибки можуть мало впливати на службове призначення виробів, оскільки допустимі відхилення параметрів є порівняно більшими.

Раніше фахівцями майже недооцінювалася можливість технологічної спадковості, тобто результатів попередніх операцій на експлуатаційні властивості готових виробів. У наш час питанням технологічної й експлуатаційної спадковості приділяється все більша увага, тому що вона суттєво впливає на якісні показники заново створюваних виробів.

Тому в монографії комплексно представлено й узагальнено основні положення та аспекти, пов'язані із проявом спадковості при обробці деталей і складанні вузлів. Показано шляхи керування явищами спадковості для забезпечення в технологічних процесах при виготовленні заданих параметрів якості й експлуатаційних властивостей виробів, на підставі цих шляхів розкрито технологічні аспекти керування якістю виробів машинобудування.

У монографії 9 розділів. У першому розділі розглянуто питання формування системи якості виробів, які виготовляються. У другому розділі розкрито технологічне спадкування як основа формування й передачі експлуатаційних властивостей виробів. У третьому розділі вивчаються фізико-механічні параметри, що наслідуються конструкційними матеріалами виробів. У четвертому – розглянуто питання забезпечення якості машинобудівних матеріалів. У п'ятому розділі приділено увагу геометричним параметрам якості деталей машин. У шостому розділі проаналізовано проблему технологічного забезпечення якості виробів. У сьомому розділі показано основні моделі технологічного й експлуатаційного спадкування. У восьмому розділі розглянуто механіку технологічного спадкування властивостей при проектуванні технологічних процесів, а в дев'ятому – представлено деякі сучасні методи поліпшення якості деталей виробів машинобудування, що виготовляються.

РОЗДІЛ 1
ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЯКОСТІ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

1.1 Загальні поняття якості виробів машинобудування

Під ***якістю об'єкта*** розуміють сукупність властивостей продукції, які визначають її придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення [1]. Об'єктом можна розглядати:

- ***продукцію (виріб, машину),*** яка може бути матеріальною, нематеріальною і їх комбінацією (наприклад, автомобіль, двигун, підшипник, редуктор та інші об'єкти відносять до матеріальної продукції; методика визначення фізичних властивостей штампованої деталі є комбінацією нематеріального й матеріального видів продукції);
- ***діяльність (процес),*** результатом якого є продукція (наприклад, процес одержання литої деталі, штампованої деталі, вузла або агрегату);
- ***організацію,*** окрему особу, систему взагалі (наприклад, механообробний цех);
- будь-яка ***їх комбінація*** (наприклад, спосіб одержання литої заготовки за виплавлюваними моделями).

Категорія «якість продукції» пов'язана з поняттям властивостей продукту.

У ***філософському*** значенні якість – це те, що становить сутність речі, продукту або явища; тобто який об'єкт, чим відрізняється один об'єкт від іншого. З погляду філософії якість не може знижуватися або підвищуватися, тому що річ не може бути гарною або поганою, вона може бути схожою або несхожою.

У ***прикладному*** значенні якість – це здатність продукції задовольняти потреби; тобто характеристика того, що об'єкт може. У цьому випадкові якість може підвищуватися або знижуватися, якщо зникають старі (погані, але, можливо, й хороші) чи з'являються нові (також погані або хороші) показники якості, а також у випадку поліпшення або погіршення значень показників.

У *правовому* аспекті під якістю розуміють сукупність властивостей продукції, які відповідають вимогам базисних кондицій, стандартів і технічних умов.

Таким чином, ***якість продукції*** – це сукупність властивостей цієї продукції, які визначають її придатність задовольняти певні потреби суспільства відповідно до її призначення й економічно виправдовують витрати на її виробництво. Виходить, підвищення якості продукції актуальне тільки в тому випадку, якщо вигода від такої продукції, котру отримує споживач, буде більшою, ніж витрати, які має виробник при її виробництві. Отже, якість зв'язана як зі споживчою вартістю, так і з вартістю товарів.

Різна міра корисності однорідних споживчих вартостей формує різний рівень їх якості. І навпаки, якісно рівною вважають продукцію, яка має кількісно однакові споживчі властивості. Значить, аналогічна, але різна за

якістю продукція повинна мати однакові основні властивості, які кількісно можуть бути різними.

Якість продукції у розумінні виробника і якість продукції у розумінні споживача – поняття взаємозалежні, але не тотожні. Коли говорять про якість з точки зору споживача, то враховують здатність продукції задовольняти не тільки потреби, але й очікування конкретного споживача.

З точки зору виробника, турбота про якість є обов'язковою протягом усього періоду виробництва та споживання продукції, відображає ефективність усіх сторін діяльності підприємства й забезпечує умови існування продукції в умовах конкуренції, в умовах ринкової економіки.

Параметри якості

Певні особливості продукції характеризуються ***властивостями (параметрами)*** якості, а конкретні значення цих параметрів називають ***показниками*** якості.

Параметри якості можуть мати кількісні (вага, розмір, потужність, продуктивність, фізико-механічні характеристики, працездатність, надійність, вартість і т. п.) або якісні (колір, естетичність та ін.) характеристики. У тих випадках, коли проводять контроль якості або його оцінювання за допомогою деяких комплексних показників, бажано, щоб якісні показники мали кількісні аналоги.

Останнім часом очевидним є збільшення числа властивостей, які характеризують якість продукції, їх ускладнення, існування розвиненої системи сертифікації якості продукції. Фактично виробництво продукції – це народження певної якості, інакше кажучи, створення об'єкта, який володіє сумою деяких властивостей.

Будь-яка продукція, що поставляється на ринок, має цілий набір ***функціональних властивостей***, які характеризують якість продукції. Ці властивості унікальні, індивідуальні для кожного об'єкта; вони мають задовольняти певні потреби.

Не менш важливими є характеристики ***загальних властивостей***, притаманних будь-якій продукції та покликаних задовольняти передбачені (очікувані) потреби. Розглянемо їх детальніше.

Надійність – властивість об'єкта зберігати свою якість протягом часу, тобто того терміну, який установлюється виробником як гарантійний у межах, очікуваних споживачем. Однією з кількісних характеристик, за допомогою яких оцінюють надійність, є час безвідмовної роботи об'єкта.

У теорії надійності застосовують терміни:

- «об'єкт, що не відновлюється» – об'єкт, який не може бути відновлений споживачем і підлягає заміні;

- «об'єкт, що відновлюється» – об'єкт, який може бути відновлений споживачем.

Надійність такого об'єкта, як технологічна система (обладнання, технологічний процес, оснащення), називають ***технологічною надійністю***. Це

властивість системи виконувати свої функції, зберігаючи протягом заданого часу свої вихідні параметри в заданих межах. Технологічний потік відносять до об’єктів, які відновлюються, оскільки після відмови він може бути відновлений.

Відмова – це вихід за межі допуску показника якості проміжного продукту або готової продукції, інакше кажучи, відмова – це подія, яка пов’язана з повною або частковою втратою виробом його працездатності.

Існують також інші поняття, пов’язані з поняттям надійності.

Безвідмовність – властивість системи (виробу) безперервно зберігати працездатність протягом деякого інтервалу часу.

Справність – стан виробу або системи (машини), при якому вони в даний момент часу за основними й другорядними параметрами відповідають усім вимогам.

Несправність – стан виробу або системи, при якому вони в цей момент часу не відповідають хоча б одній із вимог, що характеризують нормальне виконання заданих функцій.

Довговічність – властивість системи (виробу) зберігати працездатність (з перервами для технічного обслуговування або ремонту) до руйнування або іншого граничного стану.

Ремонтопридатність – пристосованість системи (виробу) до проведення операцій технічного обслуговування й ремонту, тобто до запобігання, виявлення й усунення несправностей або відмов.

Відновлюваність – властивість системи (виробу) відновлювати технічний ресурс унаслідок проведення ремонтів, а також відновлювати початкові значення параметрів унаслідок усунення відмов і несправностей.

Показником надійності, який одночасно характеризує безвідмовність технологічної системи та її здатність до відновлення функцій, є ***коефіцієнт готовності***

$$Г = \frac{T_{сер}}{T_{сер} + t_b}, \qquad (1.1)$$

де $T_{сер}$ – середнє напрацювання на відмову; t_b – середнє значення часу відновлення.

Фізичне значення коефіцієнта готовності – це ймовірність того, що система буде працювати нормально у будь-який момент часу протягом заданого періоду.

Інтенсивність відмов визначають за формулою

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot t}, \qquad (1.2)$$

де n – кількість виробів, що вийшли з ладу; N – загальна кількість виробів; t – середній час випробувань.

Середній час випробувань визначають за формулою

$$t = \frac{n_j \cdot t_j}{N}, \qquad (1.3)$$

де n_j – кількість виробів у групі, яка випробовується; t_j – тривалість випробувань у цій групі.

У наш час практично всі технологічні системи машинобудівних виробництв організовані таким чином, що відмова на будь-якій із технологічних стадій неминуче призводить до відмови всієї системи.

Підвищити надійність технологічних ліній можна такими методами:

- резервуванням об'єктів;
- зменшенням значення параметрів потоку відмов.

Резервування може бути структурним і тимчасовим. При ***структурному резервуванні*** надійність технологічної системи повинна бути вищою, ніж надійність окремих складових її елементів. Із цією метою в систему вводять основні елементи (які входять у мінімально необхідний працюючий варіант технологічної системи) та резервні елементи (призначені для забезпечення працездатності системи у випадку відмови основного елемента).

Тимчасове резервування здійснюють двома способами: використанням у найбільш проблемних підсистемах системи окремих елементів підвищеної продуктивності або встановленням на виходах підсистем.

В обох випадках забезпечується нормальне подальше функціонування складових технологічного ланцюжка у разі відмови попередньої підсистеми.

Для ***спрощення технологічної системи***, насамперед, використовують скорочення кількості елементів. У машинобудівних галузях більшість технологічних процесів вирізняється високою складністю фізико-хімічних змін, великою кількістю й широкою мережею технологічних зв'язків та мірою взаємодії між ними. Спрощення системи шляхом скорочення кількості елементів здійснюють також за рахунок використання багатофункціонального, із програмним забезпеченням обладнання.

Створення високонадійних елементів приводить до підвищення ефективності системи; причому чим складніша система, тим більш відчутний ефект. Модернізацію в цьому напрямі проводять із обов'язковим попереднім розрахунком й аналізом зовнішніх (умов навколишнього середовища) і внутрішніх (стану надійності окремих елементів) параметрів системи. При цьому визначають бажану міру надійності елемента, що модернізується.

Режим ***оптимальних параметрів функціонування системи*** передбачає вибір відповідних показників – температури, вологості, тиску тощо або концентрацію декількох технологічних операцій в одному апараті (агрегаті) для того, щоб зменшити шкідливий вплив навколишнього середовища на оброблювану деталь.

Обмеження післядії відмов елементів системи проводять з тією умовою, щоб при відмові елементів погіршувалися лише деякі характеристики, але не втрачалася працездатність системи загалом.

Із розглянутих двох груп методів підвищення надійності технологічної системи явну перевагу має друга, яка стосується зменшення значень параметрів потоку відмов. Оскільки саме вона відкриває шляхи до розв'язання проблеми підвищення ефективності конкретного машинобудівного виробництва.

На відміну від багатьох галузей промисловості найважливіші показники якості машинобудівної продукції визначають за допомогою випробувань, лабораторних вимірів фізико-хімічних, механічних та інших властивостей продуктів. Це спрощує завдання оцінювання якості цієї продукції на момент її випуску й реалізації на відміну від таких галузей, де схоже оцінювання якості можливе тільки після закінчення певного часу (наприклад, надійність машин у роботі).

Крім того, найважливіші властивості продукції формуються під впливом комплексу факторів, у тому числі об'єктивних, що не піддаються ефективному впливу.

Властивості продукції класифікують різним чином. При оцінюванні якості виділяють складні й прості властивості, еквісатисні й квазіпрості властивості, а також групи властивостей. ***Складна властивість*** може бути розділена на інші, менш складні властивості; ***просту властивість*** не можна поділити на інші властивості.

Еквісатисні властивості – властивості, які однаковою мірою здатні задовольняти будь-яку потребу (рисунок 1.1).

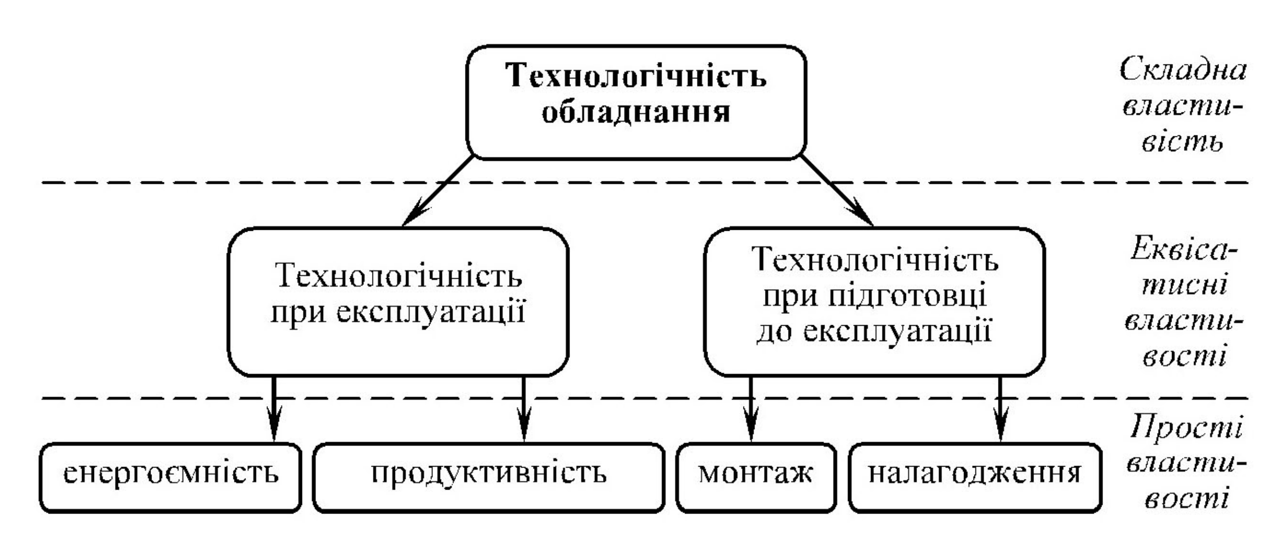


Рисунок 1.1 – Приклад розділення складної властивості на еквісатисні та прості властивості

Квазіпрості властивості – це такі складні властивості, які можна, але не треба піддавати розподілу на менш складні властивості, оскільки відома кореляційна залежність між складною властивістю та групою еквісатисних властивостей, що входять до неї.

Група властивостей – це сукупність властивостей, на які поділяються складні або еквісатисні властивості (наприклад, група органолептичних або фізико-хімічних властивостей).

Графічне зображення ієрархічної структури, яка відображає складні та пов'язані з ними інші властивості або групи властивостей, називають ***деревом властивостей***. Рівнями дерева називають ділянки дерева, на яких вводять черговий розподіл складних властивостей на менш складні, еквісатисні або прості. Рівні можуть нумеруватися від 0-го до *i*-го. На останньому *i*-му рівні розташовують тільки прості або квазіпрості властивості.

Повним деревом уважають таке, що має розгалуження до *i*-го рівня з простими або квазіпростими властивостями. Неповним деревом уважають дерево, що не має розгалуження до останнього рівня та може закінчуватися як простими, так і складними властивостями. Усіченим деревом називають повне або неповне дерево з урізаними «гілками» або «гілкою», якщо таке виключення можливе, виходячи із ситуації при проведенні оцінювання якості. Графічно дерево властивостей може бути представлено в такому вигляді (рисунок 1.2).

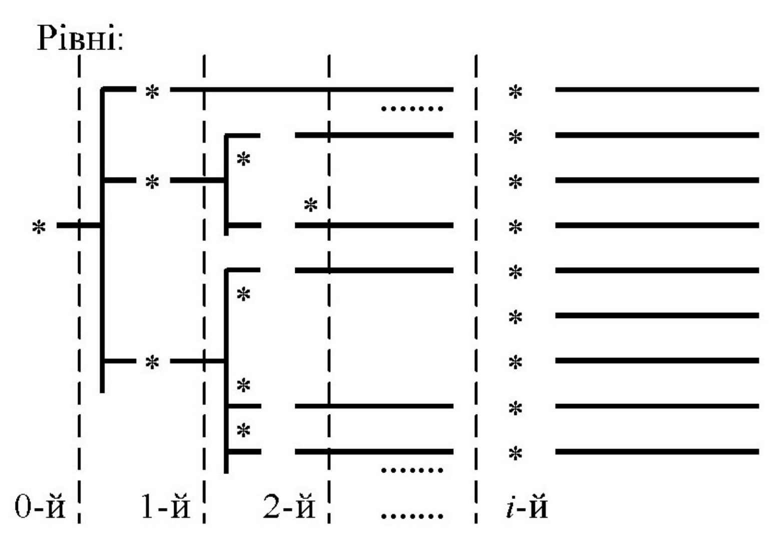


Рисунок 1.2 – Рівні дерева властивостей, зображеного графічно

Побудова дерева – важливий і відповідальний етап у проведенні оцінювання якості продукції. При побудові дерева властивостей дотримують таких основних правил:

1. Кожну виділену групу властивостей об'єднують за єдиною ознакою розподілу для всіх властивостей, які входять у неї (розподіл за однаковою основою).

2. У структуру дерева можна вносити тільки додаткові елементи або виключати інші, тобто класифікація, яка лежить в основі побудови дерева, є відкритою (можливість коригуватися).

3. Для більшості «дерев» структуру початкових рівнів розробляють за загальним алгоритмом, спираючись на дві найважливіші властивості об'єкта – функціональність та естетичність (жорсткість структури початкових рівнів).

4. Кожна складна властивість ділиться на таку групу еквісатисних властивостей, які відповідають умовам необхідної й достатньої кількості властивостей (необхідність і достатність властивостей).

5. Число властивостей, з яких складається дерево, є різним: максимальним (якщо споживачем продукції є такий значущий суб’єкт, як суспільство загалом) або мінімальним (якщо суб’єктом є група споживачів чи навіть одна людина), (правильний облік споживача продукції, що оцінюється).

6. У кожну групу властивостей уключають тільки незалежні (або частково залежні) властивості. Це диктує теоретична кваліметрія для дотримання вимоги адитивності при розрахунку комплексного показника якості (недопустимість залежних властивостей).

7. При використанні експертного методу визначення коефіцієнтів вагомості для підвищення точності експертної оцінки обмежують максимальну кількість властивостей у групі (не більше ніж 7), наближаючись до оптимальної (дорівнює 2) (мінімум властивостей у групі).

8. Усі еквісатисні властивості, включені в групу властивостей, повинні бути притаманні одночасно об'єкту, який оцінюється (одночасне існування властивостей у групі).

9. Можливість виключення яких-небудь властивостей, які однаковою мірою виражені у різних об'єктів, якість яких необхідно порівняти (виключення властивостей, що мають однакові показники якості об'єктів, котрі оцінюються).

10. Ознаку розподілу, яка має меншу кількість градацій, розглядають на більш ранніх рівнях дерева (першочерговість ознаки меншої розмірності).

11. Для обчислення оцінки якості всі властивості приводять до останнього, найвищого *i*-го рівня. У тих випадках, коли деякі прості або квазіпрості властивості розташовуються на більш низьких рівнях, такі «гілки» продовжують до останнього рівня (приведення до останнього рівня).

Правила служать практичним інструментом побудови «дерева властивостей» при проведенні комплексного оцінювання якості продукції.

1.2 Принципи формування системи якості продукції

Проектування системи якості здійснюють таким чином, щоб задовольнялися очікування й вимоги як споживачів продукції, так і її виробників. Необхідною умовою результативності функціонування системи якості є ефективний контроль над усіма технічними, адміністративними й людськими факторами, які впливають на якість продукції, що випускається.

Можна виділити чотири напрями діяльності в сфері якості, за допомогою яких формується якість продукції на різних етапах її життєвого циклу: планування, керування, забезпечення й поліпшення якості (рисунок 1.3).

Планування якості включає в себе діяльність по встановленню цілей та нормування вимог до якості продукції й процесів, а також ідентифікацію оцінки якості продукції. Основне призначення підсистеми – підготовка програми якості.

Керування якістю поєднує методи та види діяльності оперативного характеру, які застосовують для виконання вимог до якості. До процедур керування якістю відносять контроль якості, розроблення й реалізація заходів коректувального впливу на процес або об’єкт. Основне призначення цієї

підсистеми – реагування, тобто виявлення відхилень від вимог, що висуваються до якості (дефекти), прийняття рішень щодо подальшого використання такої продукції й запобігання появі повторних відхилень або дефектів за рахунок вчасного вжиття заходів коректувального впливу.

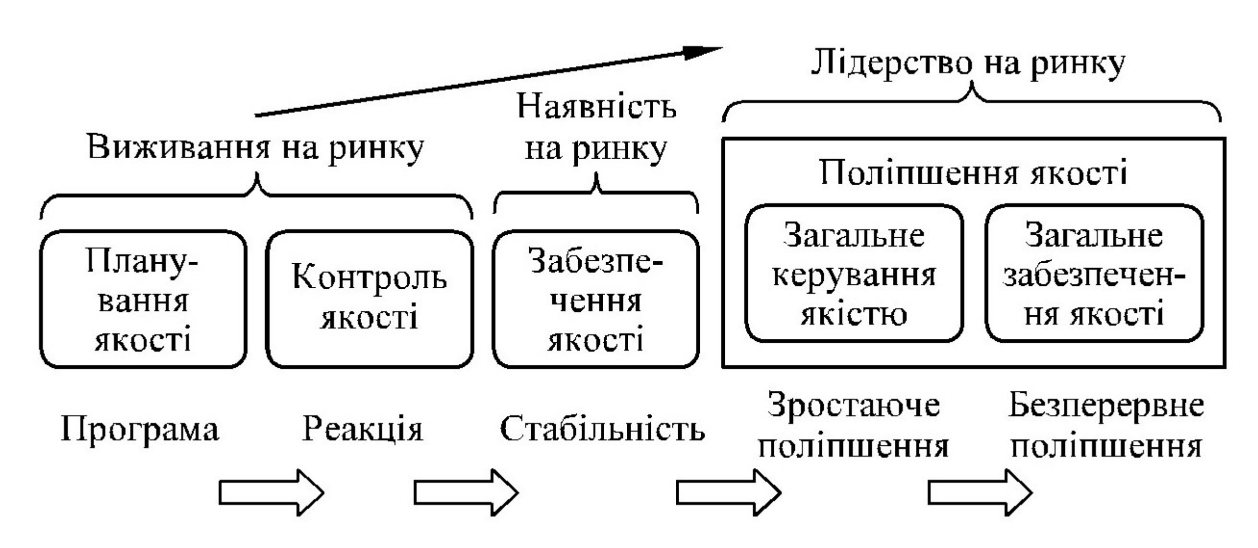


Рисунок 1.3 – Сукупність структури, що формує систему якості

Забезпечення якості включає в себе всі види діяльності, необхідні для створення достатньої впевненості в тому, що об'єкт (продукція, процес) задовольняє вимоги до якості. Розрізняють внутрішнє й зовнішнє забезпечення якості, тобто діяльність зі створення у підприємства та у споживачів й інших осіб впевненості у виконанні вимог до якості. Основне призначення цієї підсистеми – запобігання можливим відхиленням від установлених вимог для забезпечення ***стабільної якості***.

Поліпшення якості передбачає заходи, що вживають на підприємстві з метою підвищення ефективності та результативності діяльності, й одержання вигоди як для організації, так і для споживачів її продукції. Основне призначення цієї підсистеми – загальне керування якістю (поліпшення) і загальне забезпечення якості (безперервне стабільне поліпшення).

Якість машинобудівної продукції, як і будь-якої іншої продукції, формується у процесі виробництва (рисунок 1.4). Ці виробництва пов'язані з обробкою конструкційних матеріалів. Нарівні із проблемами вивчення й обліку унікальних властивостей матеріалів фахівці вирішують питання щодо використання різних способів, прийомів їх обробки, видів технологічного обладнання й оснащення.

Якість матеріалів (як сукупність його необхідних властивостей і вартості), якість обладнання (операції, що виконуються з технологічною надійністю) й оснащення є найбільш значними складовими програми планування якості продукції.

Під якістю технології мають на увазі створення раціональних і продуманих технологічних процесів, що включають певні властивості матеріалів, послідовність технологічних операцій, умови їх проведення, які рекомендують параметри контролю процесу одержання якісної продукції.

Суттєву роль відіграє якість праці, що залежить від досвіду й майстерності персоналу.

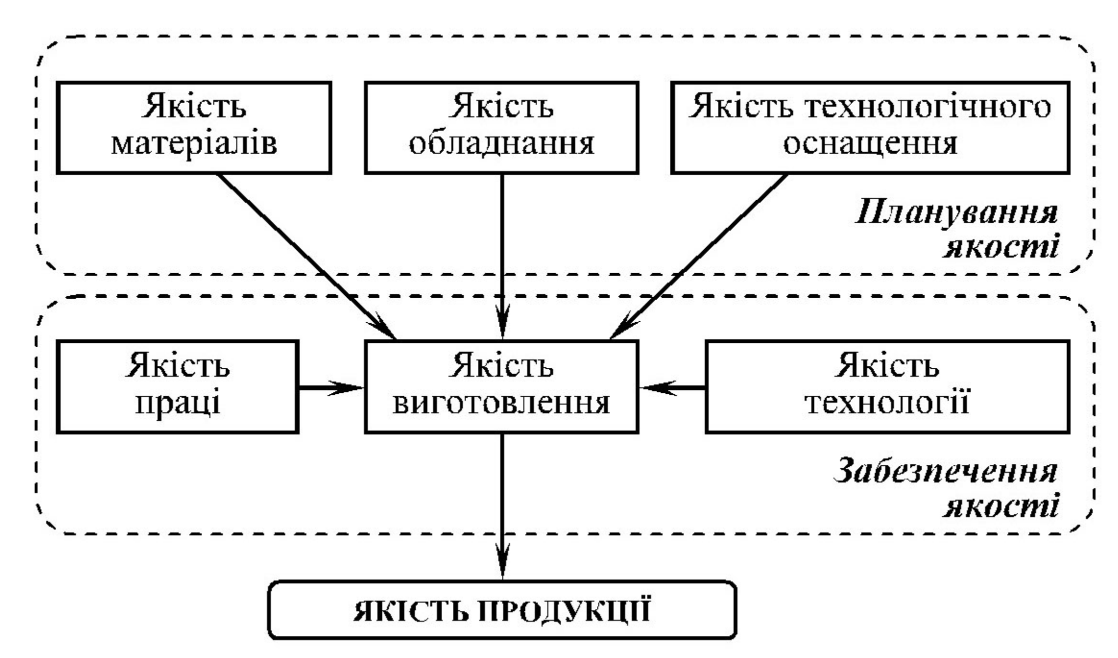


Рисунок 1.4 – Схема формування якості продукції у процесі виробництва

Суб’єктивні фактори – група факторів, зумовлених виробничою діяльністю людини (професійна майстерність, загальноосвітній рівень, психологічні особливості персоналу, особиста зацікавленість у результатах праці та ін.)

Об’єктивні фактори – технічний рівень виробництва, склад обладнання, механізація й автоматизація виробництва для випуску нової продукції, технологія і засоби вимірювання об’єктивного контролю, метрологічне забезпечення підприємства, технічний рівень експлуатаційної бази, стандартизація тощо.

Під ***умовами***, що впливають на якість продукції, мають на увазі обставини, за яких діють зазначені фактори. Сприятливі умови дозволяють найбільш повно використовувати можливості обладнання для досягнення оптимальної якості продукції з мінімальними витратами праці, енергоносіїв і фінансових коштів. Висока виробнича дисципліна, матеріальна й моральна зацікавленість, сприятлива виробнича обстановка істотно впливають на найбільш повний прояв зазначених факторів.

Системний підхід до керування якістю продукції на підприємствах базується на таких принципах:

- керування якістю – складова частина, яка органічно пов'язана із системою керування підприємством узагалі й здійснювана на всіх рівнях керування;
- керування якістю поєднує вимірювання і взаємозв'язок організаційних, технічних, економічних, соціальних та ідеологічних заходів щодо безперервного вдосконалення якості продукції;

- активне використання матеріального й морального стимулювання за досягнення високого рівня якості;

- стимулювання творчої активності працівників підприємства за поліпшення якості;

- базування на стандартизації, метрологічному забезпеченні й діючій галузевій нормативній документації.

Сьогодні визнано, що комплексне керування якістю на основі системного підходу є найбільш оптимальним напрямом підвищення якості продукції.

1.3 Проблема технологічного забезпечення якості та надійності машин

Ефективність машинобудівного виробництва визначається використанням ресурсів, продуктивністю процесів і в остаточному підсумку якістю показників машин, що випускаються [2].

Якість – сукупність характеристик об'єкта, що стосуються його здатності задовольняти встановлені й передбачувані потреби [3, 4].

Характеристика – це взаємозв'язок між залежними й незалежними змінними. ***Об'єкт*** – це те, що може бути індивідуально описано й розглянуто. Об'єктом може бути діяльність, процес, продукція, організація, система або окрема особа, а також будь-яка комбінація з них.

Процес – сукупність взаємозалежних ресурсів і діяльності, яка перетворює вхідні елементи у вихідні. До ресурсів можуть належати: персонал, обладнання, технологія, методологія й т. п.

Продукція – результат діяльності або процесів. Продукція може включати послуги, обладнання, матеріали, які переробляються, програмне забезпечення або комбінацію з них.

Поняття якості використовують також у терміні ***система якості***, який означає сукупність організаційної структури, методик, процесів і ресурсів, необхідних для здійснення загального керівництва якістю. Засоби, що використовуються в адміністративному керуванні: планування якості, керування якістю, забезпечення якості й поліпшення якості в рамках системи якості.

Планування якості – діяльність, яка встановлює цілі й вимоги до якості та застосування елементів системи якості.

Стосовно якості об'єкта, якщо ним є такий елемент промислової діяльності й виробничого процесу, як, наприклад, продукція, у міжнародних стандартах використовують термін «керування якістю». ***Керування якістю*** – методи й види діяльності оперативного характеру, які застосовують для виконання вимог до якості.

Забезпечення якості – всі плановані й систематично здійснювані види діяльності в рамках системи якості, а також підтверджувані (якщо це потрібно), необхідні для створення достатньої впевненості в тому, що об'єкт буде задовольняти вимоги до якості.

Поліпшення якості – заходи, які вживають усюди в організації з метою підвищення ефективності та результативності діяльності й процесів для одержання вигоди, як для організації, так і для її споживачів.

Поняття «якість машини» включає багато показників. ***Показник якості машини*** – це кількісна характеристика однієї або декількох її властивостей, що розглядається стосовно до певних умов створення й експлуатації цієї машини. Для оцінювання якості машин застосовують одиничні й комплексні показники [5, 6].

Найбільшого використання у машинобудуванні набули одиничні показники, які підрозділяють на виробничо-технічні й експлуатаційні [7].

Виробничо-технічні показники характеризують витрати суспільної праці на виробництво одиниці продукції (машини, приладу і т. п.) та свідчать про ступінь відповідності конструкції машини умовам її виготовлення при заданому масштабі випуску виробів [8]. До них відносять трудомісткість, матеріалоємність, енергоємність, блоковість (складальність), показники стандартизації й уніфікації [9].

До групи ***експлуатаційних*** відносять показники призначення, надійності, ергономіки й естетики.

Показники призначення характеризують ступінь відповідності машини її цільовому призначенню – потужність, продуктивність, коефіцієнт корисної дії тощо.

Однією з найважливіших узагальнюючих властивостей машин є надійність. ***Надійність*** – властивість об'єкта зберігати протягом певного часу в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції при заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. До параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції, відносять кінематичні й динамічні параметри, параметри міцності, точності функціонування, продуктивності, швидкості та ін.

Надійність – поняття, що поєднує низку властивостей об'єкта, пов'язаних з якістю виконання ним певних функцій протягом заданого часу. Тому про надійність можна говорити як про якість, розгорнуту в часі. Найбільш повно надійність визначається комплексом показників, які відображають вимоги, що висуваються до якості технічних об'єктів.

Об'єкт являє собою предмет, який можна використати за призначенням, досліджувати або випробовувати. Об'єктом може бути система і її елементи, наприклад [10]: машини, агрегати, деталі, їх поверхні й зони контакту.

Стан об'єкта, при якому він може виконувати задані функції при встановлених значеннях параметрів функціонування, називається ***працездатністю***.

Відмова – подія, у результаті якої наступає втрата працездатності. Відмови можуть бути пов'язані із утратою можливостей функціонування об'єкта або з недопустимими змінами параметрів функціонування. З точки зору можливості усунення відмови об'єкти ділять на відновлювані та невідновлювані.

Відновлюваний – це такий об'єкт, відновлення якого після відмови можливе й передбачене.

Безвідмовність – здатність об'єкта зберігати працездатність протягом заданого напрацювання.

Збережуваність – здатність зберігати експлуатаційні показники на заданому рівні протягом заданого строку зберігання, транспортування й відразу при використанні після цього строку.

Ремонтопридатність визначає властивість об'єкта, що дозволяє запобігати, виявляти або усувати відмову чи несправність.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатність до певного стану (відмови, яка не усувається) з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонту. Цей стан може наступати внаслідок зносу, поломки, недоцільності ремонту й подальшої експлуатації. Показниками довговічності є ресурс та термін служби.

Ресурс – напрацювання об'єкта до граничного стану. Термін служби визначають календарною тривалістю експлуатації виробу до моменту виникнення граничного стану, зазначеного у технічній документації.

Імовірність безвідмовної роботи *P(t)* протягом часу (напрацювання) *t*

$$P(t)=\int_t^\infty f(\tau)d\tau \text{, або } P(t)\approx N(t)/n, \quad (1.4)$$

де $f(\tau)$ – щільність розподілу часу безвідмовної роботи; $N(t)$ – число виробів, що залишилися працездатними до кінця напрацювання; n – число виробів, що випробовують.

Інтенсивність відмов для ненормованих виробів

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.5)$$

Забезпечення якості й надійності виробу з моменту початку розроблення проекту до завершення доведення і передачі в серійне виробництво базуються на інженерних показниках якості та надійності й інженерних методах їх забезпечення.

При розгляді складних та унікальних машин імовірнісно-статистична оцінка їх ознак якості виключається як на етапі проектування, так і на етапі доведення. Імовірнісно-статистичні методи оцінювання надійності вузлів, агрегатів, систем таких виробів на етапі проектування, що базуються в основному на статистичній інформації про експлуатаційні відмови, дефекти й недоліки раніше створених зразків, не мають необхідної вірогідності та мають обмежену цінність для знову створюваного виробу. Це пов'язано з низкою умов [8]:

1) при істотній різниці в рівнях параметрів та значних відмінностях у конструктивному виконанні нового й раніше створених виробів характер і причинність відмов, дефектів та недоліків відмінні й найчастіше непорівнянні;

2) перевірка надійності всіх нових елементів конструкції, вузлів, агрегатів і систем нереальна в період проектування;

3) розрахункові оцінки надійності при проектуванні, як правило, визначаються зі значними допущеннями й не відображають складності процесів і впливів численних факторів.

Імовірнісно-статистичні методи оцінювання надійності вузлів, агрегатів, систем у цілому на етапі доведення дослідного зразка неприйнятні внаслідок кількісно малої вибірки дослідних виробів. Витрати засобів на забезпечення достатньої однорідної вибірки імовірнісної оцінки надійності великі й рівні приблизно загальній сумі витрат на все доведення виробу.

Подальший розвиток техніки супроводжується не тільки форсуванням робочих процесів і підвищенням напруженості елементів машини, але й одночасною жорсткістю вимог до її якості та надійності при безперервному скороченні часу на розроблення. Це суттєво ускладнює процес забезпечення якості.

Забезпечення якості й надійності проводиться поетапно.

Надійність машини закладається при проектуванні, відпрацьовується при доведенні, забезпечується при виготовленні в серійному виробництві й підтримується в експлуатації.

Забезпечення надійності складається з аналізу працездатності вузлів і деталей при проектуванні, відпрацьовуванні конструкції й параметрів, забезпечення розробником технологічної надійності та стабільності якості на стадії доведення і серійного виробництва, забезпечення розробником надійності в експлуатації.

Структурну схему забезпечення надійності та її складових по етапах наведено на рисунку 1.5 [8].

Забезпечення надійності та високої якості продукції на етапі створення й освоєння виробництва виробів полягають в організації такої технологічної підготовки і здійсненні виробництва, при яких готова продукція відповідала б вимогам конструкторської документації й не мала б шкідливих наслідків від технологічних методів обробки (технологічної спадковості).

Основні напрями керування виробничо-технічною надійністю і якістю продукції при створенні нових зразків техніки передбачають:

- забезпечення високої технологічності конструкції на етапі розроблення конструкторської документації;
- розроблення й відпрацювання технологічного процесу з урахуванням досвіду роботи на аналогічних виробах;
- застосування більш досконалих технологічних процесів;
- організацію робіт зі вчасного виявлення й усунення недоліків виробництва;
- вивчення і виключення негативного впливу технологічного процесу на працездатність виробу;

- застосування досягнень науки і техніки в засобах технологічного оснащення, обладнанні й приладах;

- механізацію й автоматизацію технологічного процесу, окремих операцій і прийомів обробки.

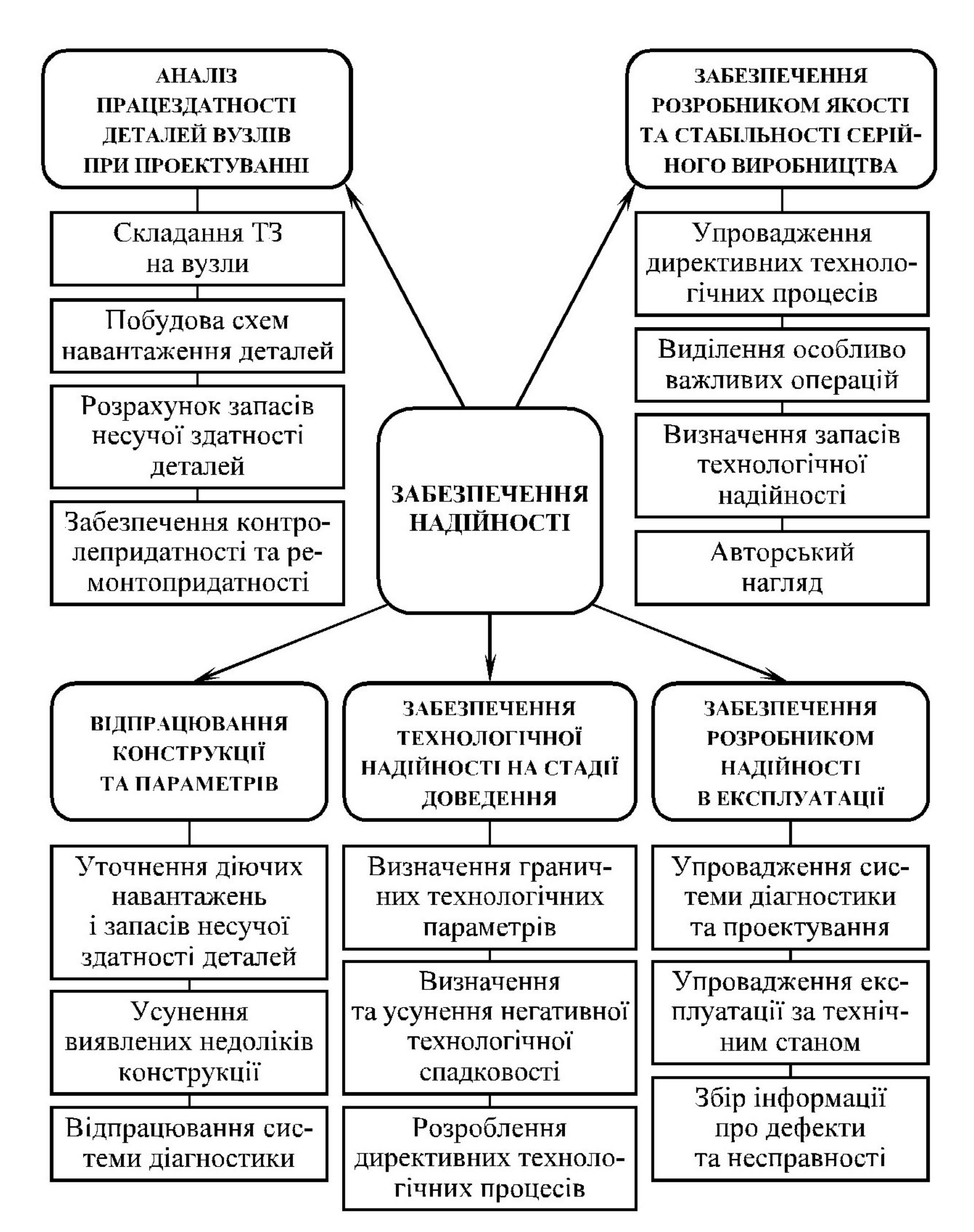


Рисунок 1.5 – Схема забезпечення надійності

1.4 Кваліметрична оцінка якості продукції

Машинобудівні виробництва пов'язані з обробкою багаточисленних і різних матеріалів (сталей, чавунів, сплавів, пластмас тощо), що мають унікальні властивості. Технологія обробки та складання виробів уключає використання різних способів, прийомів обробки, видів технологічного обладнання й оснащення.

Пріоритетними напрямами при створенні високоякісної продукції, а отже, і найбільш значущими факторами при оцінюванні якості є: надійність, довговічність, безвідмовність; безпека; вартість.

Фактично при застосуванні нових технологій або вдосконаленні існуючих технологій, а також при створенні нової продукції метою є одержання якісної продукції за доступною ціною. Зрозуміло, що вартість продукції, за інших рівних умов, визначається технологічністю виробництва (ефективне використання сировинних ресурсів за рахунок удосконалення технологічного обладнання, раціональної організації виробництва, створення безвідходних технологій, використання нетрадиційних матеріалів (композитних, порошкових і т.п.). Можна стверджувати, що якість готової продукції, яка оцінюється, значною мірою формується в процесі виробництва та меншою – в процесі експлуатації. Для визначення якості продукції проводять зазвичай просте й комплексне її оцінювання [11].

Оцінку якості називають простою, якщо оцінюється одиничний показник, і комплексною, якщо розглянуто хоча б один з комплексних показників. Розрізняють такі види комплексних показників якості:

- ***груповий*** – кількісно характеризує однорідну групу властивостей;
- ***функціональний*** – характеризує всі властивості (сукупність групових показників);
- ***інтегральний*** – характеризує всі властивості, у тому числі економічні (сукупність функціональних і економічних, витратних показників).

Уміння надійно оцінювати якість, у тому числі й кількісно, дозволяє цілеспрямовано нею керувати – у заданому напрямі, межах і в заданий термін. Застосування кваліметричної оцінки якості продуктів дозволяє встановлювати залежність між якістю продукції та її вартістю, кількісно оцінювати перспективність технологічних розроблень на ранніх стадіях їх проведення, здійснювати більш обґрунтований вибір найкращої продукції з декількох видів альтернативної або однотипної.

Алгоритм комплексної оцінки якості продукції

Теоретична кваліметрія – спеціальна галузь наукових знань, пов'язаних з вимірюванням і оцінкою якості продукції, – базується на таких основоположних принципах.

1. Окремі властивості продукції становлять багаторівневу ієрархічну структуру її якості. Властивості i-го рівня формуються відповідними властивостями (i+1)-го рівня (i = 0, 1, 2, 3...); шляхом вимірювання або

обчислення ці властивості можуть діставати чисельні характеристики – абсолютні показники (P_{ij}).

2. Вимірювання окремих властивостей або самої якості взагалі в кінцевому результаті повинне завершуватися обчисленням відносного показника якості $K_{ij} = F\left(P_{ij}, P_{jj\,баз}\right)$, де $P_{jj\,баз}$ – базовий показник, прийнятий за вихідний при порівняльних оцінках якості.

3. Різні шкали вимірювання абсолютних показників властивостей обов'язково повинні бути трансформовані в одну загальну шкалу (наприклад, безрозмірну).

4. Кожна властивість якості визначається двома числовими параметрами: відносним показником K_o і вагомістю *M*.

5. Сума вагомостей властивостей одного рівня є постійною величиною $M_{ij} = const$. Коефіцієнт вагомості цього показника якості продукції є кількісною характеристикою його значимості серед інших показників при комплексному оцінюванні якості.

Інакше кажучи, для одержання комплексної оцінки необхідно вибрати й виміряти значущі параметри (властивості), кількісно їх «зважити» і розрахувати сумарну оцінку з подальшим її аналізом. Алгоритм комплексної оцінки якості представлено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Алгоритм комплексної оцінки якості продукції

Для складання ієрархічної структури якості виробу раціонально виділити одну або кілька груп властивостей, а також внутрішньогрупові властивості, сформувавши в такий спосіб «дерево властивостей».

Потрібно пам'ятати при цьому, що не існують якості або властивості як такі, а є конкретні об'єкти (продукти) з певними властивостями та якістю. Виділивши будь-які властивості та вимірявши їх, не можна стверджувати, що виміряна якість. Показники властивостей лише непрямо характеризують якість; від того, наскільки грамотно складене «дерево властивостей», що становить реальний інтерес для споживача, залежить об'єктивність отриманої оцінки якості.

Для вибраного кола параметрів вимірюють їх експериментально (органолептичними методами, за допомогою приладів, візуально та ін.) і визначають необхідні показники якості, виражаючи їх у таких одиницях вимірювання (абсолютних показниках), які відповідають цьому показнику – кілограмах, градусах, метрах і т. п.

Що стосується вибору ***еталонного*** й ***бракувального*** значень показників, то їх визначають із урахуванням вимог теоретичної кваліметрії, а саме:

- ***еталонним*** приймають найкраще з відомих у світовій практиці значення показника серед схожих об'єктів або трохи вище (для того, щоб оцінювання якості проводилося в шкалі відношень, а не в шкалі рангів – якщо еталонним прийняте краще значення серед об'єктів, які порівнюються);

- ***бракувальним*** уважають таке значення показника, починаючи з якого всі інші, ще гірші, оцінюються однаковою оцінкою $K_i = 0$.

Як ***базовий зразок*** може бути вибраний аналогічний зразок, котрий відповідає всім показникам вимог нормативної документації (якщо оцінюють рівень якості продукції в умовах цього виробництва); або зразок, котрий розглядається як прототип, контроль (якщо оцінюють заново створювану продукцію); або зразок, показники якості котрого зустрічаються у переважній більшості аналогічної продукції (якщо оцінюють продукцію масового виробництва).

Визначають еталонне, базове (допустиме) і бракувальне значення показників якості. При цьому значення абсолютних показників P_i коливаються у деякому інтервалі $P_i^{бр} \leq P_i \leq P_i^{ет}$ (для зростаючого показника) або $P_i^{ет} \leq P_i \leq P_i^{бр}$ (для спадаючого показника).

Виражені в різних одиницях вимірювання абсолютні значення показників якості продукції неможливо звести в загальний комплексний показник без трансформування до загальної шкали вимірювання. Найбільш прийнятною є безрозмірна шкала.

Безрозмірне значення показника якості, виражене в одиницях шкали відношень, означає, у скільки разів величина, яка розглядається в одиницях певної розмірності, більша за іншу задану величину, виражену в одиницях тієї ж розмірності. Здійснити такий перехід можливо різними способами.

1. Із використанням формули

$$q_i = \frac{P_i - P_i^{бр}}{P_i^{ет} - P_i^{бр}}. \qquad (1.6)$$

При цьому способі переведення абсолютних показників у відносні розраховують, наскільки якість зразка відрізняється від якості еталона. Якби зразок мав еталонну якість, то

$$q_i = \frac{P_i - P_i^{бр}}{P_i^{ет} - P_i^{бр}} = \frac{P_i^{ет} - P_i^{бр}}{P_i^{ет} - P_i^{бр}} = 1.$$

Тому відносні показники якості зразків виробів при використанні вказаного способу переведення, як правило, менші від одиниці.

2. Використовують формули:

$$q_i = \frac{P_i - P_i^{бр}}{P_i^{баз} - P_i^{бр}}; \qquad (1.7)$$

$$q_i = \frac{P_i}{P_i^{баз}}; \qquad (1.8)$$

$$q_i = \frac{P_i^{баз} - P_i^{бр}}{P_i - P_i^{бр}}; \qquad (1.9)$$

$$q_i = \frac{P_i^{баз}}{P_i}. \qquad (1.10)$$

Формули (1.8) і (1.10) застосовують у випадках, коли $P_i^{бр} = 0$. Формули (1.7) і (1.8) використовують тоді, коли зниження значення P_i приводить до зниження якості виробу, а формули (1.9) і (1.10) – коли зниження значення P_i, приводить до підвищення якості.

При застосуванні цього способу відносні показники якості будуть рівні 1, якщо абсолютні показники якості зразка збігаються з базовими значеннями, тобто

$$q_i = \frac{P_i - P_i^{бр}}{P_i^{баз} - P_i^{бр}} = \frac{P_i^{баз} - P_i^{бр}}{P_i^{баз} - P_i^{бр}} = 1.$$

Значення показників якості будуть більші від одиниці в тому випадку, коли якість досліджуваного зразка перевищує якість базового зразка.

Використовуючи цей спосіб, можна визначити, наскільки якість зразка відрізняється від якості базового виробу.

3. Переводять абсолютні показники якості в безрозмірні за допомогою графіка функції бажаності Харрінгтона (рисунок 1.7).

Зауважимо, що вертикальна вісь являє собою шкалу оцінок якості окремих показників. На ній використовують загалом 5 інтервалів, інтервали шкали від 1 до 0: 1,00...0,80 – дуже добре; 0,80...0,63 – добре; 0,63...0,37 – задовільно; 0,37...0,20 – погано; 0,20...0,00 – дуже погано. Оцінка 0,80...0,63 – хороший рівень, що перевищує оптимальний ($K_{i\,опт}$ = 0,63). Оцінка 0,63...0,40 – недостатньо хороший, але все-таки прийнятний рівень за нормативною документацією. Оцінка 0,40...0,30 – гранична зона, за наявності нормативної документації частина продукції вже не буде їй відповідати. Якщо абсолютне значення показника властивості відповідає мінімальній границі, передбаченій нормативною документацією, то K_i = 0,37. Таким чином, $K_{i\,ет} = 1,0$; $K_{i\,опт} = 0,63$; $K_{i\,доп.(баз)} = 0,37$; $K_{i\,брак} = 0,37$. Горизонтальна вісь – безрозмірна. Однак для того, щоб виділити на ній інтервали, використовують інтервали вертикальної осі. Тоді утворюють розмірні шкали (у тому числі з нерівномірним масштабом) для кожного показника якості, що відповідають відмінній, добрій, задовільній і поганій якості продукції за цією властивістю.

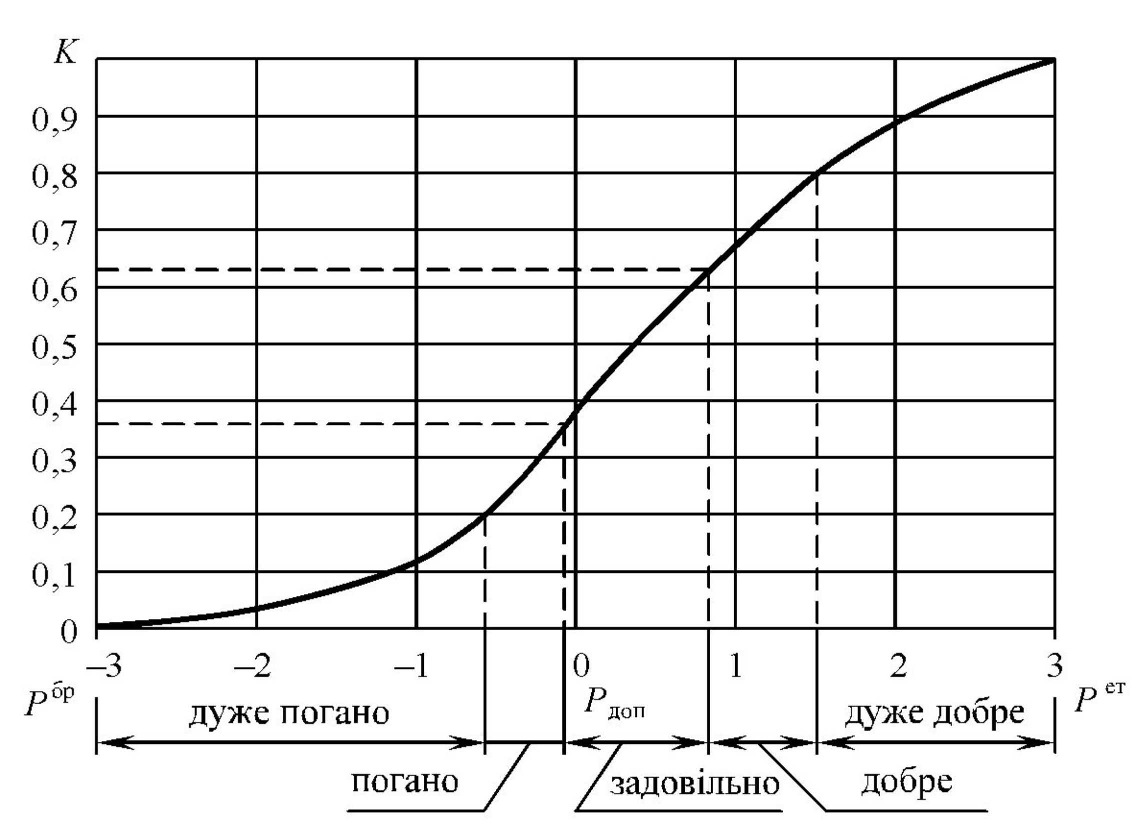


Рисунок 1.7 – Графік функції бажаності Харрінгтона

Розбиття горизонтальних розмірних шкал проводять експертним шляхом з урахуванням особливостей продукції, що оцінюється, та цілей дослідження.

При використанні шкали Харрінгтона максимально можлива відносна оцінка, як і за першим способом, дорівнює 1 (оцінка якості еталонного зразка).

Оцінка базового зразка становить 0,63, а мінімальна оцінка – 0,37. Продукція, що отримує більш низьку оцінку, є неякісною.

Способи визначення коефіцієнтів вагомості

Для розрахунку коефіцієнтів вагомості застосовують експертний, вартісний і статистичний методи.

Експертний метод представляє сукупність методів, основаних на усередненому обліку думок фахівців у цій галузі.

Вартісний метод передбачає встановлення функціональної залежності між коефіцієнтом вагомості й грошовими (трудовими) витратами, необхідними для існування цієї властивості.

Згідно зі статистичним методом коефіцієнт вагомості приймається як деяка функція від імовірності досягнення кожним одиничним показником якості продукції свого базового значення.

Якщо число зразків продукції перевершує число вибраних для оцінки показників властивостей, застосовують ***метод вартісної регресійної залежності***. Він ґрунтується на визначенні регресійної залежності між показниками якості продукції та витратами на її створення й експлуатацію. В тому випадку, коли для розрахунків комплексного показника якості використовують середній зважений геометричний показник, то регресійну залежність записують за допомогою такого рівняння

$$Y(k)=\sum_{i=1}^{n}\mu_i X_i(k); \quad (1.11)$$

$$Y(k)=\lg\frac{S(k)}{S_{сер}}, \quad (1.12)$$

де $S(k)$ – показник якості виробу, зменшення якого приводить до поліпшення якості (витратний, вартісний показник); $S_{сер}$ – середнє арифметичне вартісного показника, отримане по всіх зразках продукції

$$S_{сер}=\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}S(k), \quad (1.13)$$

де M – кількість варіантів виробів, що порівнюються;

$$X(k)=\lg\left(P_i(k)/P_{i\,ср}\right), \quad (1.14)$$

де $P_i(k)$ – показники якості i-го варіанта виробу; $P_{i\,ср}$ – середнє арифметичне відповідного показника якості по всіх варіантах виробів

$$P_{i\,cp} = \frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M} P_i\,(k), \qquad (1.15)$$

де i – кількість показників якості, які розглядаються у кожного варіанта виробу ($i = 1...m$); μ_i – параметри апроксимації, які визначаються методом найменших квадратів.

У цьому випадкові $m_i \approx \mu_i$, тобто коефіцієнти вагомості дорівнюють відповідним параметрам регресійної залежності.

Метод граничних та номінальних значень використовують у тих випадках, коли відомі гранично припустимі значення для показників якості придатної продукції цього виду. Залежно від типу середньозваженого показника якості, що розраховується, коефіцієнти визначають за формулами:

• комплексний показник – середньозважений арифметичний

$$m_i = \frac{\lambda}{\overline{\overline{P_i}} \cdot \widetilde{P}_i}; \qquad (1.16)$$

• комплексний показник – середньозважений геометричний

$$m_i = \frac{\lambda}{\lg\left(\overline{\overline{P_i}} / \widetilde{P}_i\right)}; \qquad (1.17)$$

• комплексний показник – середньозважений квадратичний

$$m_i = \frac{\lambda}{\overline{\overline{P_i^2}} \cdot \widetilde{P_i^2}}, \qquad (1.18)$$

де $\overline{\overline{P_i}}$ – номінальне (середнє статистичне) значення для абсолютного показника якості; $\widetilde{P}_i$ – гранично допустиме значення показника якості (визначається дослідним шляхом); λ – постійний множник.

Значення λ вибирають так, щоб відносні зміни середнього зваженого комплексного показника якості дорівнювали відповідним відносним змінам вартісного показника (витрати на створення й експлуатацію продукції).

Метод еквівалентних співвідношень застосовують у тому випадкові, коли якійсь відносній зміні кількості продукції еквівалентна відносна зміна показника якості з точки зору ефективності використання продукції. Тоді коефіцієнти вагомості для середніх зважених показників якості розраховують за формулою

$$m_i = \frac{\Delta K / K}{\Delta P_i / P_i}, \quad (1.19)$$

де $\Delta K / K$ – відносна зміна кількості продукції; $\Delta P_i / P_i$ – відносна зміна показника якості.

Якщо при однаковій відносній зміні кількості продукції еквівалентно змінюються деякі з показників її якості, то коефіцієнти вагомості для цих показників якості приймають рівними одиниці.

У тих випадках, коли коефіцієнти вагомості не можна визначити ніяким з відомих розрахункових методів, застосовують ***експертний метод***. Треба сказати, що взагалі експертні методи характеризуються точним результатом. Експертні методи застосовують у випадках, коли інші способи менш точні або більш трудомісткі.

Зменшенню суб'єктивності, що властива експертним методам, сприяє проведення опитування експертів у два-три тури.

Експерти визначають коефіцієнти вагомості показників якості в балах (за п’яти або десятибальною шкалою, у частках одиниці і т. д.). Потім знаходять середнє арифметичне значення коефіцієнта, визначеного експертною групою для *i*-го показника якості за формулою

$$\overline{a_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{n} a_{ij}, \quad (1.20)$$

де n – кількість показників якості продукції; N – кількість експертів; a_{ij} – параметри вагомості *i*-го показника, надані *j*-им експертом.

Нормовані коефіцієнти вагомості розраховують за формулою

$$m_i = \frac{\overline{a_i}}{\sum_{i=1}^{n} a_i}. \quad (1.21)$$

При цьому виконуються умови, що сума нормованих коефіцієнтів дорівнює одиниці й жоден із коефіцієнтів не дорівнює нулю.

Коефіцієнти вагомості визначають різними способами: переваг, рангів, попарних зіставлень, послідовних зіставлень і т. д. Обробка результатів експертних оцінок полягає у такому.

При ранжируванні показників зростання міри важливості або присвоєння цим показникам рангів експертами (метод переваг або рангу) значення кожного приведеного коефіцієнта вагомості знаходять за формулою

$$m_i = \frac{R_i 2^{(1-L)}}{\sum_L R_i 2^{(1-L)}}, \quad (1.22)$$

де R_i – ранг i-го показника або його порядковий номер у таблиці показників; L – кількість експертів.

При ранжируванні показників за спадною мірою важливості (метод послідовних зіставлень), коли менш важливі показники розташовують після більш важливих, коефіцієнти розраховують, користуючись формулою

$$m_i = \frac{R_i 2^{(1-R_i)}}{\sum_L R_i 2^{(1-R_i)}}. \quad (1.23)$$

Формули (1.22) та (1.23) справедливі, коли можна виділити найбільш важливі показники. Для загальних випадків користуються формулою

$$m_i = \frac{1-(R_i-1)/L}{\sum_L \left[1-(R_i-1)/L\right]}. \quad (1.24)$$

Отримані за цією формулою коефіцієнти вагомості відрізняються від тих, що стоять поряд, на ту саму фіксовану величину. Тобто отримана залежність буде мати лінійний характер.

Якщо хочуть, щоб коефіцієнти вагомості нелінійно відрізнялися один від одного, то застосовують формулу

$$m_i = \frac{1-(R_i-1)/R_i}{\sum_L \left[1-(R_i-1)/R_i\right]}. \quad (1.25)$$

Значення коефіцієнтів вагомості, отримані за цією формулою, підпорядковуються гіперболічній залежності.

Методи визначення якості продукції

Для визначення оцінки якості продукції викладено багато найрізноманітніших підходів; їх застосування в тій або іншій практичній ситуації зумовлюється особливостями продукції, що оцінюється, кількістю представлених для оцінки зразків, кількістю властивостей, які враховуються.

Математично якість продукції виражають через рівень якості продукції. Це відносна характеристика продукції, основана на зіставленні значень, що входять у комплексний показник якості продукції, з базовими значеннями відповідних показників.

Проводять вимірювання кожного показника дослідного зразка й базового, вводять коефіцієнти вагомості кожного параметра. Потім проводять «зважування» зміни кожного параметра й «згортання» отриманих зважених відношень у єдиний комплексний показник.

Найбільш простим у застосуванні є ***диференціальний метод***. Він ґрунтується на зіставленні сукупності значень одиничних показників якості цієї продукції з аналогічними значеннями базових показників. Таким чином, визначають відносні значення показників, що оцінюються, користуючись формулами

$$q_i = \frac{P_i}{P_{i\,баз}} \qquad (1.26)$$

або

$$q_i = \frac{P_{i\,баз}}{P_i}, \qquad (1.27)$$

де P_i – значення i-го показника (i = 1, 2, 3, ..., n) якості продукції, що оцінюється; $P_{i\,баз}$ – базове значення i-го показника; n – кількість показників, що оцінюються.

Залежність (1.26) вибирають у тому випадкові, якщо підвищення значення показника приводить до підвищення якості продукції загалом, і, навпаки, формулу (1.27) використовують, коли зниження показника приводить до підвищення якості.

Якщо відносні показники не «зважують», то в такий спосіб оцінюють рівень якості продукції. Якщо всі відносні значення більше (дорівнюють або менше) одиниці, то рівень якості продукції вищий (дорівнює або менше) від базового рівня, що оцінюється.

Комплексне оцінювання якості продукції проводять такими методами: інтегральним; середньозваженим; змішаним.

Комплексний показник якості ***інтегральним методом*** розраховують із використанням функціональної залежності комплексного показника якості від одиничних показників. Розрахунок визнають придатним, якщо вибрана залежність відображає фізичну суть розглянутого явища або відповідає дійсному процесу використання продукції за призначенням.

Зауважимо також, що при розрахунках комплексного показника цим способом кількість властивостей, які входять у формулу, є кінцевою (на відміну від величезної різноманітності властивостей, притаманних реальному об'єкту). Подібні обмеження вводяться експертами, щоб уникнути зайвої складності розрахунків або, навпаки, не врахування найбільш важливих, які визначають властивості продукції.

Комплексну оцінку якості ***методом визначення середньозваженого показника*** розраховують за формулами:

- для середньозваженого арифметичного показника

$$K_o = \sum m_i \cdot q_i \,, \tag{1.28}$$

- для середньозваженого геометричного показника

$$K_o = \prod \left(q_i\right)^{m_i} ; \tag{1.29}$$

$$\sum m_i = 1 \text{ та } m_j > 0 \,, \tag{1.30}$$

де m_i – коефіцієнти вагомості окремих показників якості; q_i – відносні показники якості.

Комплексну оцінку ***змішаним методом*** проводять у тих випадках, коли частина показників якості досліджуваних зразків і базовий об'єднані математичною залежністю. Тоді розраховують на їх основі інтегральний показник та відносний інтегральний показник. Ті показники, які не ввійшли в інтегральний, використовують для розрахунків відносних показників (диференціальним методом).

Іноді комплексні показники критикують за те, що при їх обчисленні допускається перекриття важливого, але низького за значенням, показника іншим, менш важливим, але більш високим. Однак детальне вивчення методів проведення комплексної оцінки показує, що вищезгаданий недолік можна уникнути.

У рамках реалізації інтегрального методу можна регулювати границі області задоволення найбільш важливих показників. І якщо значення таких показників виходять за встановлені межі, то їх можна приймати рівними нулю (якщо функціональна залежність являє собою вироблення співмножників) або взагалі не проводити розрахунок комплексної оцінки. При використанні середньозваженого геометричного показника один або кілька показників, які відносяться до найбільш важливих і які є співмножниками добутку, можуть приймати тільки два значення – 1 (відповідає вимогам) або 0 (незадовільний за якістю). В такому випадку або всі інші множники множать на одиницю, або добуток (а значить, і комплексний показник) дорівнює нулю. Якщо розрахунки проводять за допомогою середньозваженого арифметичного показника, то вплив на комплексну оцінку низького важливого показника регулюють величиною коефіцієнта його вагомості.

Оцінку інтегральної якості розраховують за формулою

$$K_{інт} = K_{еф} \cdot K_o \,, \tag{1.31}$$

де $K_{інт}$ - показник інтегральної якості об'єкта; $K_{еф}$ – коефіцієнт (або відносний показник) ефективності; K_o – комплексний показник якості об'єкта.

Залежно від ситуації вважають за необхідне визначати тільки комплексний показник якості, виключаючи з дерева властивостей квазіпросту властивість економічності. Однак у більшості випадків ураховують не тільки результати у вигляді якості продукції, але й пов'язані з ними витрати. Таким чином, предметом підсумкової оцінки є не якість, а інтегральна якість об'єкта або продукції.

РОЗДІЛ 2
ТЕХНОЛОГІЧНА СПАДКОВІСТЬ – БАЗА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

2.1 Сутність явища спадковості

Проблема керування технологічними процесами виготовлення деталей і складання машин зазвичай обмежується рамками окремих операцій. Проте для забезпечення якості машин необхідно всебічно дослідити експлуатаційні властивості деталей, ураховуючи дію технологічної спадковості. Це означає, що всі операції та їх технологічні переходи потрібно розглядати не ізольовано, а у взаємозв'язку, тому що кінцеві характеристики формуються всім комплексом технологічних дій та змінюються при експлуатації машини [12].

З моменту появи матеріалу як певної речовини і до надання йому бажаних розмірів та властивостей він проходить через кілька станів, що характеризуються параметрами якості. Будь-який технологічний процес приводить до зміни цих параметрів і може бути представлений траєкторією точки, що рухається в (n + 1)-мірному просторі станів від початкового до кінцевого стану [13].У будь-який момент часу стан об'єкта (матеріалу, заготовки, деталі) визначається кінцевим числом властивостей $x_1, ..., x_i, ..., x_n$. Будь-який стан при цьому повинен розглядатися як результат станів, що мали місце в минулому.

Різні траєкторії являють собою різні технологічні процеси та різноманітні умови наступної експлуатації об'єкта. Тому кожний процес і конкретні умови слід розглядати в топологічному плані, з урахуванням тимчасової історії зміни параметрів якості об'єкта. Крім того, необхідно розглядати синергетичні ефекти, що створюються технологічними процесами й спостерігаються при експлуатації, загальна дія яких перевищує гадану суму окремо взятих явищ. Пошук синергетичних ефектів являє собою важливий резерв засобів керування властивостями об'єкта [14, 15].

Будь-який об'єкт виробництва перебуває в різноманітних зв'язках і взаємодіях з явищами, що його оточують. Усяке явище визначається умовами його проходження. Розгляд явища в розвитку пов'язаний з поняттям спадковості.

Під ***спадковістю*** в технології машинобудування в наш час розуміють явище переносу властивостей оброблюваного об'єкта від попередніх операцій та переходів до наступних, яке надалі позначається на експлуатаційних властивостях деталей машин [14, 16].

Носіями спадкоємної інформації є оброблюваний матеріал і поверхні деталі з усім різноманіттям параметрів, які їх описують. Носії інформації беруть активну участь у технологічному процесі, проходячи через різні операції й переходи, зазнаючи впливу технологічних факторів.

У технологічному ланцюжкові існують свого роду «бар'єри». Деякі технологічні фактори подолати ці «бар'єри» не можуть, і в такому випадку їх

вплив на кінцеві властивості об'єкта відсутній. Інші фактори такі «бар'єри» проходять, але при цьому значно втрачають свою початкову силу й впливають на кінцеві властивості дуже слабко [12].

Найбільш суттєвим «бар'єром» є термічні операції, а також операції, що супроводжуються поверхневим деформуванням і зміцненням, оскільки вони змінюють мікроструктуру оброблюваного матеріалу, мікрогеометрію поверхні, що формується, приводять до жолоблення деталі й викривлення її форми. У ході цих операцій різні вади поверхні, такі, як структурна неоднорідність, пори, мікротріщини, можуть розвиватися або «заліковуватися».

Отже, процесом технологічного спадкування можна керувати для того, щоб властивості, які позитивно впливають на якість деталі, зберегти протягом усього технологічного процесу, а властивості, які впливають негативно, — ліквідувати на його початку.

2.2 Спадковість і фізичне старіння машин

Для аналізу поведінки машини у цей момент часу і передбачення можливої зміни її параметрів за наступний відрізок часу в більшості випадків необхідно розглядати явища, які супроводжують процеси виготовлення й експлуатації певної машини в розвитку з урахуванням їх взаємозв'язку [17].

У першому наближенні лінійну теорію спадковості досліджуваний об'єкт представляє у вигляді системи, реакція якої (H) пов'язана із зовнішнім впливом (X) функціональною залежністю [18, 19]

$$H = f\left(X\right). \tag{2.1}$$

Цю залежність називають визначальним рівнянням, або визначальним законом, який у загальному вигляді формулюється таким чином: реакція $H(t)$ у момент часу t визначається не тільки величиною $X(t)$ у той же момент, але також і всією історією зміни функції $X\left(\tau\right), i \in \left[-\infty, t\right]$ [18, 19].

Визначальний закон представляється символічним записом

$$H = F_{-\infty}^{t}\left(X\right), \tag{2.2}$$

де функціонал $F_{-\infty}^{t}$ має такі властивості

$$F_{-\infty}^{t}\left(X_1 + X_2\right) = F_{-\infty}^{t}\left(X_1\right) + F_{-\infty}^{t}\left(X_2\right), \tag{2.3}$$

$$F_{-\infty}^{t}\left(cX\right) = cF_{-\infty}^{t}\left(X\right).$$

У цьому випадкові визначальний закон може бути виражений через лінійні оператори, зокрема через інтегральні оператори Вольтера $K*$, а саме

$$H = (1 + K^*)X\,, \tag{2.4}$$

або

$$H = X(t) + \int_{-\infty}^{t} K(t,\tau)X(\tau)d\tau. \tag{2.5}$$

Тут функція $K(t,\tau)$ – ядро оператора K^*.

Якщо на відрізку часу $\tau \in [0,T]$, $X(\tau) \neq 0$, а при $t > T$, $X = 0$, то

$$H(t) = \int_{0}^{\tau} K(t,\tau)X(\tau)d\tau, \tag{2.6}$$

де $\tau \in [T,\infty]$.

У моменти часу $t > T$, коли вплив *X* відсутній, система ще зберігає зміни (реакцію), пов'язані із цим впливом у попередній відрізок часу $\tau \in [0,T]$. Поведінка ядра спадковості $K(t,\tau)$ на відрізку $\tau \in [0,T]$ і за межами цього відрізка при $t \to \infty$ визначає характер зміни системи у часі. Якщо ядро задовольняє умові «загасаючої пам'яті», тобто при збільшенні *t* ядро прямує до нуля, то процес, що описується інтегральним рівнянням, оборотний. Прямування ядра до кінцевої межі зі збільшенням *t* характеризує процес із незворотним наслідком, а необмежене зростання ядра за цих умов передбачає виникнення нестійкого процесу.

При аналізі процесів виготовлення й експлуатації машин у контактних задачах (рисунок 2.1) використовуємо модель Максвела.

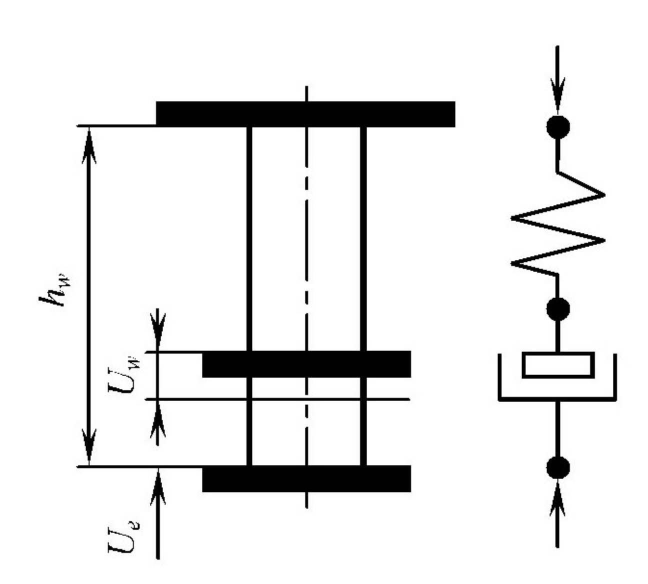


Рисунок 2.1 – Схема елемента, що зношується

Відносна пружна деформація елемента висотою h_w об'єкта, який розглядається

$$\varepsilon_e = \frac{U_e}{h_w}, \quad (2.7)$$

де U_e – пружна деформація (переміщення) елемента контактного шару. Відносний знос елемента

$$\varepsilon_w = \frac{U_w}{h_w}, \quad (2.8)$$

де U_w – лінійний знос елемента.

Повне переміщення одного кінця елемента відносно іншого U_s, дорівнює

$$U_s = U_e + U_w, \quad (2.9)$$

а у відносних одиницях

$$\varepsilon_s = \varepsilon_e + \varepsilon_w. \quad (2.10)$$

Пружна складова деформації може бути виражена через напруження σ і модуль пружності E

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}. \quad (2.11)$$

Тоді при деформації в'язкопружного тіла та зношуванні елемента контактного шару величину ε представляють у такому вигляді [20]

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{E}\int_0^t \prod\nolimits_w (t - t_1)\,\sigma(t_1)\,dt_1, \quad (2.12)$$

де $\prod_w (t - t_1)$ – ядро зносу

$$\prod\nolimits_w (t) = \frac{1}{\sigma}\frac{d\varepsilon_w(t)}{dt}. \quad (2.13)$$

Удосконалення методів оцінювання, прогнозування й підвищення надійності машин пов'язане з представленням їх у вигляді систем, процеси втрати працездатності яких мають післядію. Моделі цих процесів можуть бути

розроблені на основі вивчення зв'язків експлуатаційних властивостей деталей, вузлів, механізмів та машини в цілому з технологією виготовлення деталей і складання машини, а також з умовами та режимами її експлуатації. Більшість із цих зв'язків можна віднести до зв'язків спадкового типу. При цьому необхідно розрізняти технологічну спадковість [12, 13, 16], зумовлену послідовністю технологічних операцій, режимами обробки деталей, якістю контролю й регулювання механізмів, та експлуатаційну спадковість [14, 17, 21], зумовлену послідовністю й інтенсивністю експлуатаційних впливів на вузли та механізми машини в процесі її роботи, періодичністю і якістю ремонтних робіт.

2.3 Методи опису механізму спадкування

Технологічний процес і процес експлуатації досить точно можуть бути представлені за допомогою графів, котрі, як правило, є орієнтованими й ациклічними (рисунок 2.2) [13].

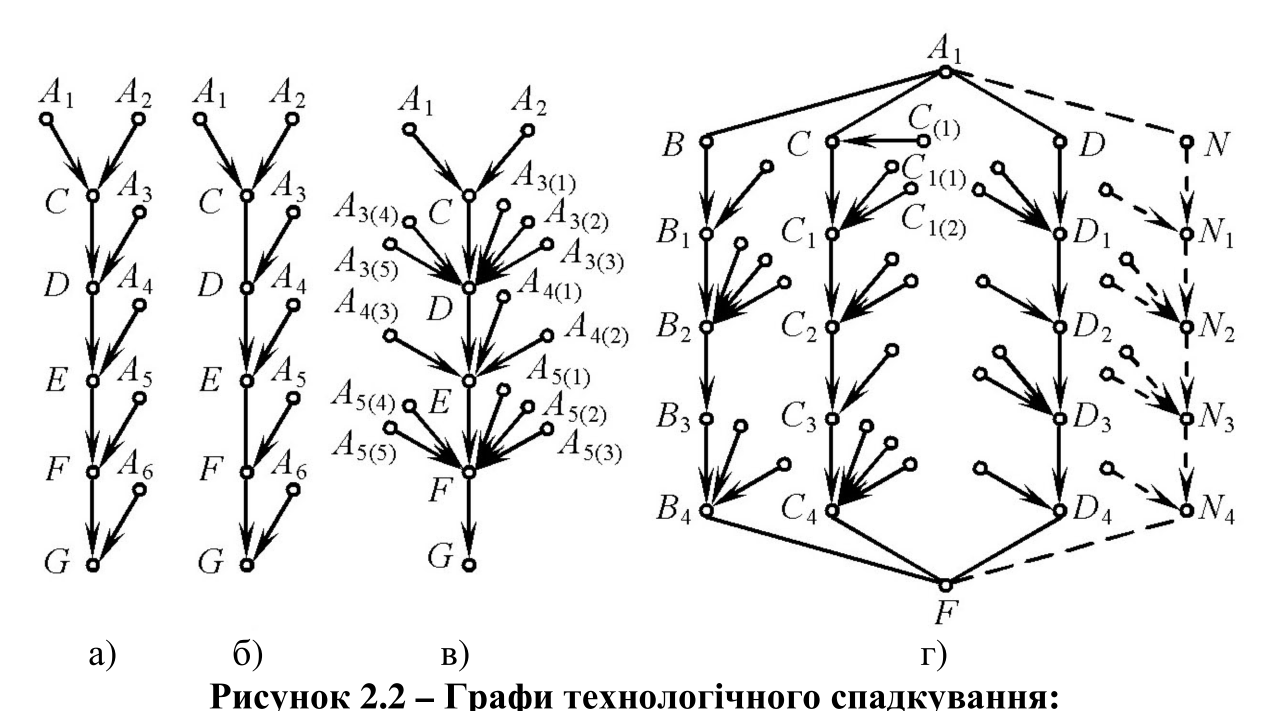


Рисунок 2.2 – Графи технологічного спадкування:
а – орієнтований; б – змішаний з неорієнтованими ребрами;
в – комбінований, що відображає спільну дію факторів;
г – розгорнутий, що враховує комплекс параметрів

Вершина A_1 графа являє собою сукупність властивостей заготовки, вершина A_2 – ті властивості, які з'являються на певній операції обробки заготовки. Орієнтовані ребра A_1C і A_2C показують передачу властивості у процесі обробки. Таким чином, створюється об'єкт C із властивостями, характерними для A_1 й A_2. Потім застосовують ще низку операцій, кожна з яких утворює на оброблюваному об'єкті додаткові властивості. У результаті об'єкт G є готовою деталлю, яка поєднує в собі властивості A_1, C, D, E, F (рисунок 2.2, а).

Ребра A_2C, A_3D, A_4D і т. Д. Є неодмінно орієнтованими, тобто такими, що показують зміну властивостей. Це пояснюється тим, що операції A_2C, A_3D й інші впливають на об'єкти, після чого відбувається обов'язково зміна властивостей. Ребра ж A_1C, CD, DE і т. д. можуть бути й не орієнтованими, тобто не можна стверджувати, що властивості A_1, C, D та інші будуть неодмінно перенесені в подальшому ході технологічного процесу. Операції технологічного процесу можуть ліквідувати деякі властивості об'єктів і створити нові.

У цьому випадкові спадкування певних властивостей представляється змішаним графом (рисунок 2.2, б), у якого деякі ребра не є орієнтованими. Властивості C, D, ..., G, що створюються в ході технологічних операцій, формуються відповідно до особливостей проведення цих операцій. Наприклад, лезовим інструментом можна проводити обробку, застосовуючи ту або іншу охолоджувальну рідину, спеціальний підігрів або охолодження заготовки тощо. Аналогічно процес шліфування може супроводжуватися спеціально здійснюваними коливаннями інструмента або заготовки, особливими умовами її закріплення й ін. Відповідно до цього технологічне спадкування представляється комбінованим графом (рисунок 2.2, в). У ньому під індексами $A_{3(1)}$, $A_{3(2)}$ слід розуміти ті властивості об'єкта D, які створюються за рахунок особливостей проведення технологічних операцій, що забезпечують синергетичний ефект.

З погляду технологічного забезпечення надійності найбільший інтерес становлять такі параметри заготовок деталей, як точність розмірів, форма перетинів, напруження поверхневих шарів та ін. Тому доцільно механізм спадкування представляти розгорнутими графами в більш повному вигляді (рисунок 2.2, г). Тут комплекс властивостей A_1 заготовки представляється конкретними її властивостями B, C, D, ..., N, кожна з яких зазнає зміни в ході технологічного процесу. Нехай C – відхилення форми заготовки. За рахунок властивостей $C_{1(1)}$ та інших особливостей $C_{1(2)}$, …, $C_{1(\rho)}$ операції чорнового точіння ця похибка перетворюється в C_1 і т. д. Наприкінці технологічного процесу спадкове відхилення форми становитиме C_4. Це відхилення є одним з параметрів, що визначають якість F готової деталі. Звичайно, повинні враховуватися тільки ті спадкові властивості, які вирішальним чином впливають на надійність виробу. Оскільки графи, котрі розглядаються, є орієнтованими, загальне число властивостей, які спадкуються, визначиться однією із сум:

$$M = \rho(A_1) + \rho(A_2) + ... + \rho(A_n) = \rho^*(A_1) + \rho^*(A_2) + ... + \rho^*(A_n), \quad (2.14)$$

де $\rho(A_1)$, …, $\rho(A_n)$ – число ребер, які виходять із вершин $A_1, ..., A_n$ графа; $\rho^*(A_1)$, …, $\rho^*(A_n)$ – число ребер, які входять у ці вершини; n – число вершин графа, наприклад, для рисунку 2.2, а:

$$\rho(A_1)=\rho(A_2)=\rho(C)=\rho(A_3)=\rho(D)=\rho(A_4)=$$
$$\rho(E)=\rho(A_5)=\rho(F)=\rho(A_6)=1;$$

$$\rho^*(A_1)=\rho^*(A_2)=\rho^*(A_3)=\rho^*(A_4)=\rho^*(A_5)=\rho^*(A_6)=0;$$

$$\rho^*(C)=\rho^*(D)=\rho^*(E)=\rho^*(F)=\rho^*(G)=2.$$

В обох випадках сума дорівнює 10. Отже, властивості готової деталі *G* являють собою сукупність десяти властивостей, отриманих у ході технологічного процесу. Проте, звичайно питоме значення їх у формуванні кінцевих властивостей деталі буде різним.

Графи, що характеризують технологічну спадковість, за своєю сутністю подібні до графів, що називаються генеалогічними. Останні ж показують вплив спадкової інформації, що передається від двох об'єктів до третього, властивості якого формуються залежно від властивостей цих двох об'єктів. На відміну від генеалогічних графів, котрі не можуть бути замкненими, циклічними, графи, що відображують процес технологічного спадкування в окремих випадках можуть представлятися циклами. Це можливо, коли мова йде про ремонт дорогих частин машини (рисунок 2.3, а). Граф, що розглядається від *A* до *F* у напрямку стрілок, являє собою процес виготовлення деталі, властивості якої характеризуються значенням *F*.

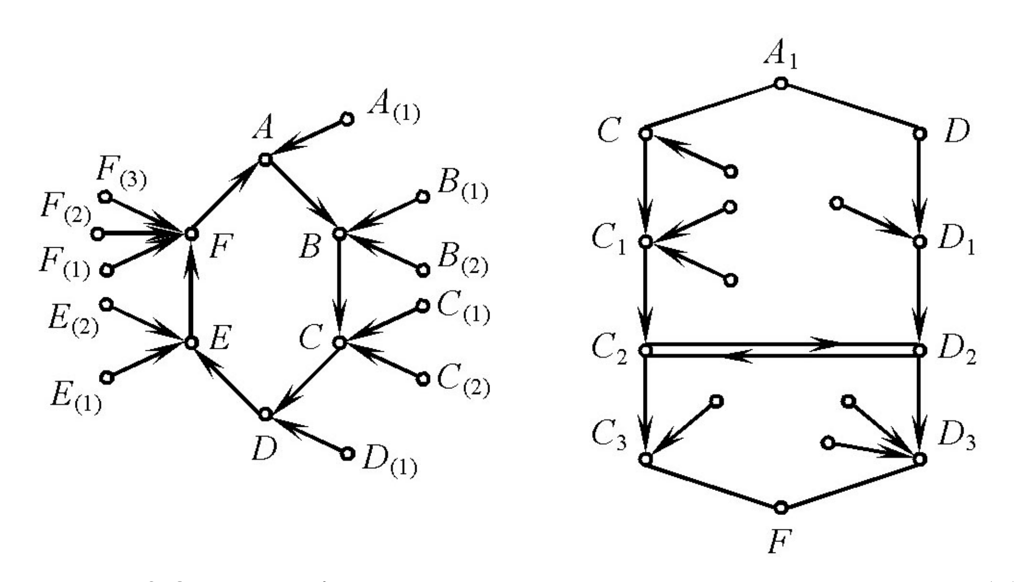


Рисунок 2.3 – Циклічний граф спадкування властивостей (а) та граф зі зворотними зв'язками, що враховує взаємовплив властивостей (б)

Однак коли ця деталь потребує ремонту, вона може бути використана як заготовка для виготовлення нової деталі, але, звичайно, інших розмірів. Ребро *FA* вказує на перенесення окремих властивостей готової деталі на заготовку.

Графи, що характеризують спадковість, складаються з окремих ланцюжків, усередині яких стрілки спрямовані в одну сторону (див.

рисунок 2.2). Ця єдність напрямків символізує перебіг процесу й перенесення властивостей оброблюваного об'єкта від операції до операції. Складність спадкування разом з тим полягає в тому, що не завжди вдається розглядати ланцюжки графа відокремлено. Складніший випадок спадкування маємо, коли зміна однієї якості оброблюваного об'єкта викликає зміну іншої (рисунок 2.3, б). Якщо ланцюжок властивостей C-C_1-C_2-C_3 характеризує, наприклад, зміну похибок форми деталі в процесі обробки, а ланцюжок D-D_1-D_2-D_3 – зміну напружень, то перешийок графа вказує на взаємний вплив цих властивостей. Дійсну картину спадкування описують аналогічні графи з більшим числом перешийків. Однак такі графи є досить складними й не дозволяють відокремити головні зв'язки від другорядних. Тому для практичних цілей частіше користуються графами, побудованими на основі спрощуваних допущень. Разом з тим необхідно відзначити, що саме ці графи (див. рисунок 2.3, б) показують найважливішу властивість кібернетичних систем – наявність зворотного зв'язку. Всяка система, яка розглядається з позицій спадкування, містить у собі велику кількість регуляторів зі зворотним зв'язком. Ці регулятори притаманні системі, їх робота не завжди чітко може бути усвідомлена дослідниками, детально описана і, тим більше, використана для керування властивостями оброблюваних об'єктів.

В основі графа, що показує спадкування, лежить орієнтоване ребро, умовно наділене стрілкою. Саме воно вказує на передавання властивостей. Відсутність хоча б одного орієнтованого ребра знімає питання про спадкування, тому що вся передісторія виготовлення цього об'єкта виявляється не пов'язаною з подальшою обробкою й експлуатацією.

Поряд з методом графів для ілюстрації явищ технологічної спадковості використовують кореляційний аналіз. Одержувана за допомогою розрахунків автокореляційна функція показує ступінь спадкування двох випадкових величин [13]. Спадкування визначається на основі експериментальних даних з використанням нормованої взаємокореляційної функції зв'язку. Так, для профілів поверхні

$$K_{R_m R_n} = (\Delta l) = \frac{M\left[\dot{y}_m(l_i)\,\dot{y}_n(l_{i+1})\right]}{\sigma_m(l_i)\sigma_n(l_{i+1})}, \qquad (2.15)$$

де $K_{R_m R_n}$ – взаємна кореляційна функція зв'язку профілів поверхні на попередній та наступній операціях; $M\left[\dot{y}_m(l_i)\,\dot{y}_n(l_{i+1})\right]$ – математичне очікування добутку центрованих профілів; $\dot{y}_m(l_i)$ – поточне центроване значення координати точки профілю поверхні після попередньої операції на ділянці l_i; $\dot{y}_n(l_{i+1})$ – після проведення наступної операції, на ділянці l_{i+1} $(l = 0, 1, 2, 3, ...)$; $\sigma_m(l_i)$ – середньоквадратичне відхилення координат профілю після попередньої операції для будь-якої ділянки поверхні l_i; $\sigma_n(l_{i+1})$ – після проведення наступної операції на ділянці l_{i+1}.

Використання методу кореляційного аналізу вимагає більшої кількості вимірювань, що створює суттєві труднощі, особливо для високоточних деталей.

2.4 Технологічний процес і експлуатація у зв'язку з явищами спадковості

Кількісні зв'язки технологічного спадкування дозволяють визначити, наскільки великий вплив спадковості на надійність роботи деталі у зібраній машині.

Кожне ребро графа характеризується передачею ребра k. Властивість x_0, виражена будь-якою вершиною графа, змінюється у ході технологічного процесу й характеризується величиною x_1.

Таким чином, $x_1 = (1/k)x_0$, $x_1 = x_0/k$, отже, передача являє собою коефіцієнт, що вказує на кількісну зміну властивості.

Розглянемо граф (рисунок 2.4), який передбачає, з одного боку, послідовність операцій технологічного процесу, а з іншого – основні параметри деталі та їх зміну в ході технологічного процесу. Граф показує не тільки вплив окремих параметрів деталі на якість складання, але й зміну цих параметрів у процесі експлуатації зібраного виробу. Властивості (параметри) заготовки (точність розмірів, відхилення форми перетину, шорсткість та ін.) занумеровані, як і операції технологічного процесу. Із графа видно, що точність розмірів заготовки за рахунок явищ спадковості певним чином позначається на деталі, що надходить на складання. Операції технологічного процесу істотно впливають на точність розмірів, послідовно збільшуючи її, однак розсіювання розмірів готових деталей виявляється пов'язаним з розсіюванням розмірів заготовки. Аналогічно відхилення форми заготовок можуть успадковуватися й проявлятися на складанні.

Технологічна послідовність виготовлення деталей може бути доповнена етапом експлуатації деталей у машині. Тоді можна оцінити спадкоємний зв'язок параметрів, які характеризують надійність деталі, що експлуатується, з аналогічними параметрами, на будь-якій операції технологічного процесу. Більше того, останній етап може бути розділений на певні проміжки часу.

Для графа, що розглядається (див. рисунок 2.4), маємо:

- $k_1 = \delta_i/\delta_{i+1}$ – коефіцієнт зміни точності (δ – допуск на розмір; i – номер поточної операції або переходу; l – число операцій або переходів понад i, після проведення яких кількісно визначається величина цієї властивості);
- $k_2 = \Delta_i/\Delta_{i+1}$ – коефіцієнт зміни форми перетину заготовки або деталі (Δ – відхилення форми);
- $k_3 = Ra_i/Ra_{i+1}$ – коефіцієнт зміни шорсткості (Ra – середньоарифметичне відхилення профілю);
- $k_4 = \sigma_i/\sigma_{i+1}$ – коефіцієнт зміни напруження поверхневих шарів (σ – напруження у поверхневих шарах);
- $k_5 = HB_i/HB_{i+1}$ – коефіцієнт зміни твердості матеріалу (HB – твердість за Брінеллем);
- $k_6 = h_i/h_{i+1}$ – коефіцієнт зміни хвилястості (h – висота хвилі);

• $k_7 = HV_i/HV_{i+1}$ – коефіцієнт зміни структури поверхневих шарів (HV – мікротвердість за Віккерсом).

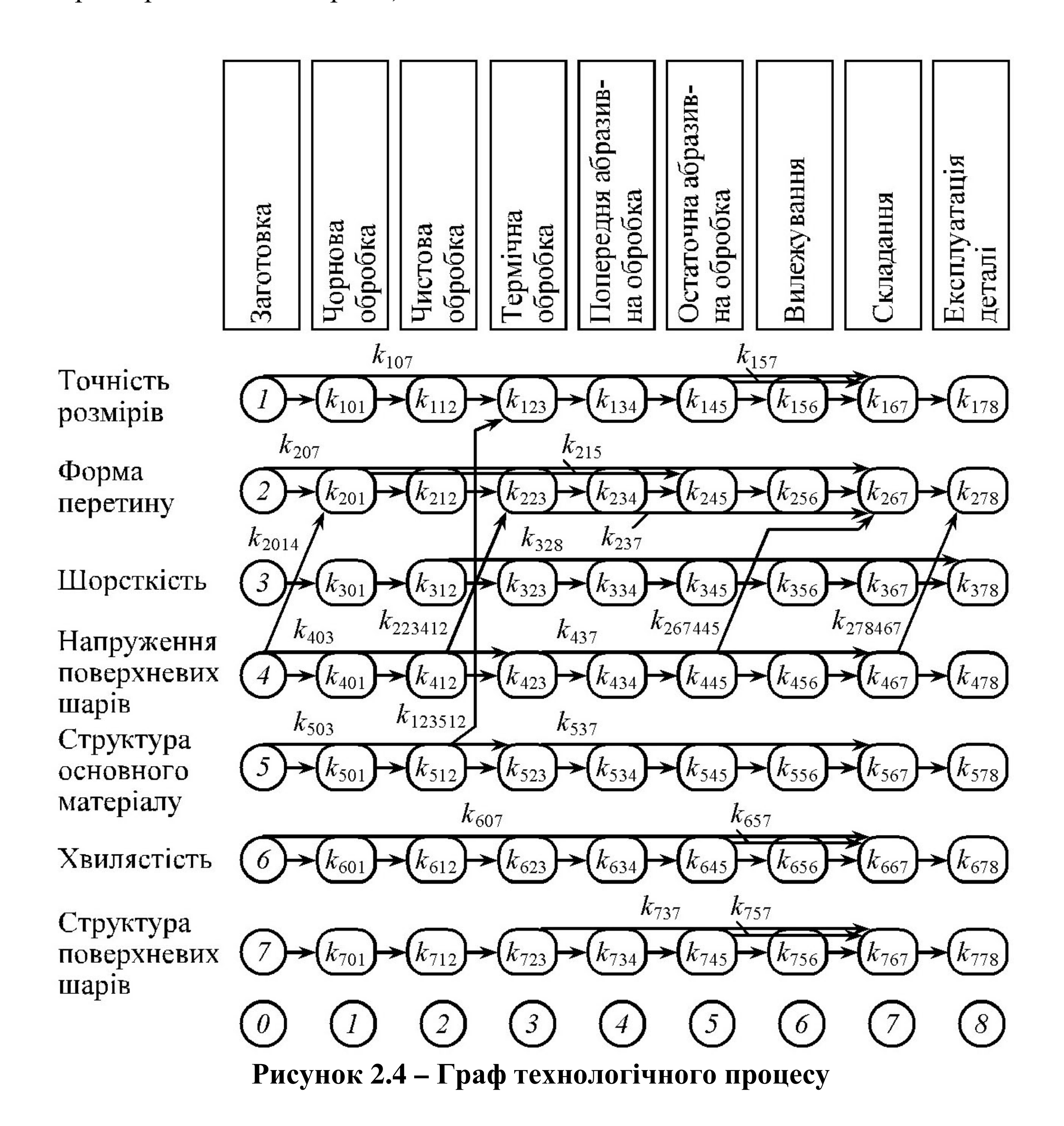


Рисунок 2.4 – Граф технологічного процесу

Коефіцієнти характеризуються простими дробами, у яких чисельник указує на кількісне вираження величини, що відображає властивість до проведення відповідної операції, а знаменник – після її проведення.

Індекс передачі являє собою звичайно тризначну цифру. Оскільки всі властивості заготовки або деталі занумеровані, так само як і операції технологічного маршруту (див. рисунок 2.4), індекси розшифровуються таким чином: 1-а цифра – характеристика певної властивості заготовки або деталі; 2-а і 3-я цифри – найменування або номер попередньої та наступної операцій, на яких проявляється спадковість.

Для більш складних випадків спадковості індекси передач можуть складатися із чотирьох цифр. Так, передача k_{2014} означає, що форма (2) перетину заготовки (0) після чорновий лезової обробки (1) визначається напруженнями поверхневих шарів (4).

Двозначні індекси властивостей x розшифровуються таким чином: 1-а цифра – характеристика певної властивості заготовки або деталі; 2-а цифра – найменування або номер операції, на якій або після якої визначається ця властивість. Так, x_{37} – шорсткість (3) деталі на складанні (7).

Оскільки на якість деталі вирішально впливають не всі, а окремі її властивості, то для виявлення картини спадкування цих властивостей доцільно будувати відособлені каскадні графи (рисунок 2.5). На основі графа технологічного процесу (див. рисунок 2.4) можна побудувати граф для встановлення спадкоємних зв'язків з будь-якого параметра деталі. Так, спадкування відхилень форми поперечного перерізу (2) від заготовки (0) до складання (7) однієї з деталей представляється каскадним графом (рисунок 2.5, а).

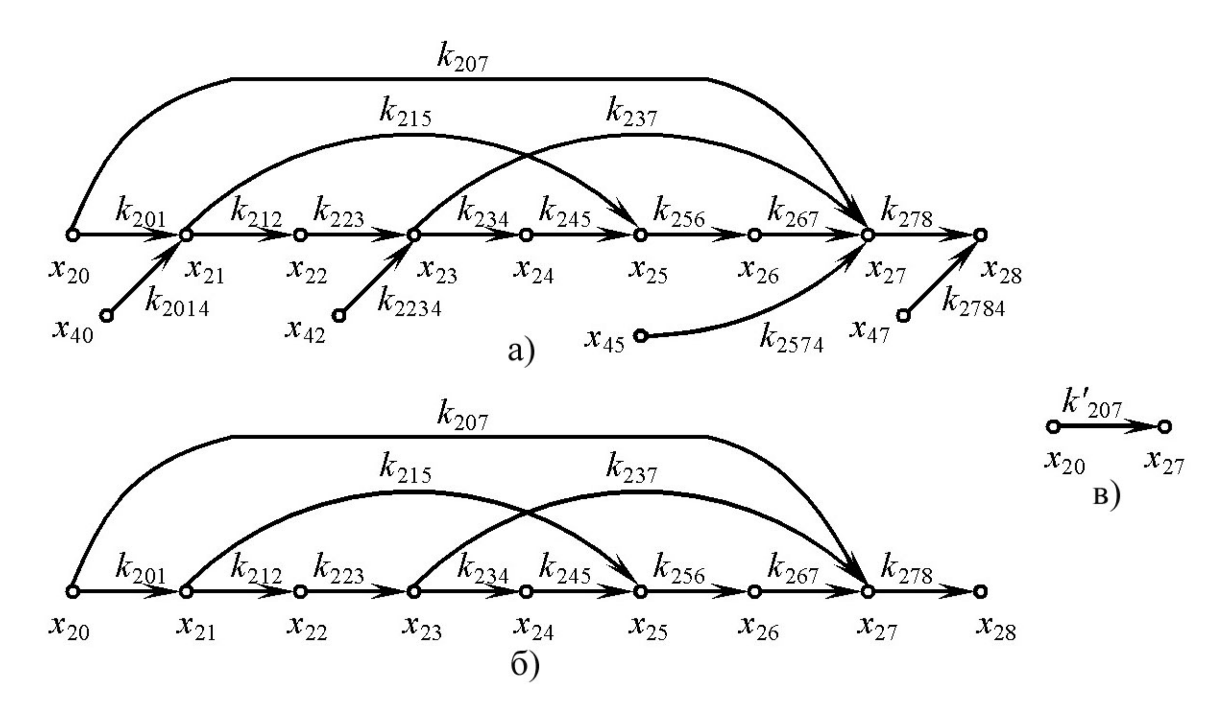


Рисунок 2.5 – Каскадні графи:
а – початковий; б – спрощений; в – приведений

Відповідно до зображення (див. рисунок 2.5, а) технологічне спадкування відхилень форми деталей представляється системою рівнянь:

$$x_{21} = \frac{1}{K_{201}} x_{20} \left[\frac{1}{K_{2014}} x_{40} \right]; \; x_{22} = \frac{1}{K_{212}} x_{21};$$

$$x_{23} = \frac{1}{K_{223}} x_{22} \left[\frac{1}{K_{2234}} x_{42} \right]; \; x_{24} = \frac{1}{K_{234}} x_{23};$$

$$x_{25} = \frac{1}{K_{245}} x_{24} + \frac{1}{K_{215}} x_{21}; \; x_{26} = \frac{1}{K_{256}} x_{25};$$

$$x_{27} = \frac{1}{K_{267}} x_{26} + \frac{1}{K_{237}} x_{23} + \frac{1}{K_{207}} x_{20} + \left[\frac{1}{K_{2574}} x_{45} \right];$$

$$x_{28} = \frac{1}{K_{278}} x_{27} + \left[\frac{1}{K_{2784}} x_{47} \right].$$

Простішому випадку спадкування, коли не враховується взаємний вплив різних властивостей (рисунок 2.5, б), відповідає система рівнянь, у якій відсутні складові у квадратних дужках.

Для знаходження значень x_{i+1} скористаємося першими (i+1) рівняннями та приведеним графом (рисунок 2.5, в), який надає x_{i+1} у функції від x_i.

Шукана передача $k'_{207} = x_{20}/x_{27}$ – визначається методом підстановки

$$x_{27} = x_0 \left\{ \frac{1}{k_{212}} \frac{1}{k_{201}} \left[\frac{1}{k_{256}} \left(\frac{1}{k_{223}} \frac{1}{k_{224}} \frac{1}{k_{225}} \right) + \frac{1}{k_{237}} \frac{1}{k_{223}} \right] + \frac{1}{k_{207}} \right\}.$$

У системі, яка має зворотний зв'язок (рисунок 2.6), передача встановлюється підстановкою $x_3 = x_2/k_2$ в $x_2 = x_1/k_1 + x_3/k_3$.

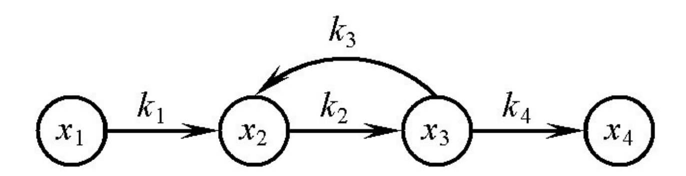


Рисунок 2.6 – Граф системи зі зворотним зв'язком

Вона виявляється рівною

$$\frac{x_1}{x_2} = k_1 \left(1 - \frac{1}{k_2 k_3} \right),$$

де – 1-1/(k_2k_3) – коефіцієнт зворотного зв'язку, на який необхідно помножити передачу k_1, щоб виявити повний вплив технологічних та експлуатаційних дій на формування властивостей.

2.5 Експлуатація машини з урахуванням явищ спадковості

На процес утрати працездатності машин впливають спадкові явища [17].

Так, працездатність і довговічність вузлів тертя металорізальних верстатів залежать від точності виготовлення деталей, від контурної площі контакту поверхонь тертя, від контактної твердості та інших факторів, зумовлених технологією виготовлення, контролю й складання. Під час роботи верстата певним чином розподіляється тиск у зоні тертя й формується профіль зношеної поверхні. Зношування поверхонь тертя приводить до перерозподілу контактних тисків, зміни контактної твердості та умов змащення, тому інтенсивність їх зношування у форсований момент часу залежить не тільки від величини діючого у цей момент навантаження і розмірів оброблюваної деталі, але й від усієї передісторії роботи верстата, його профілактичного обслуговування та ремонтів [22].

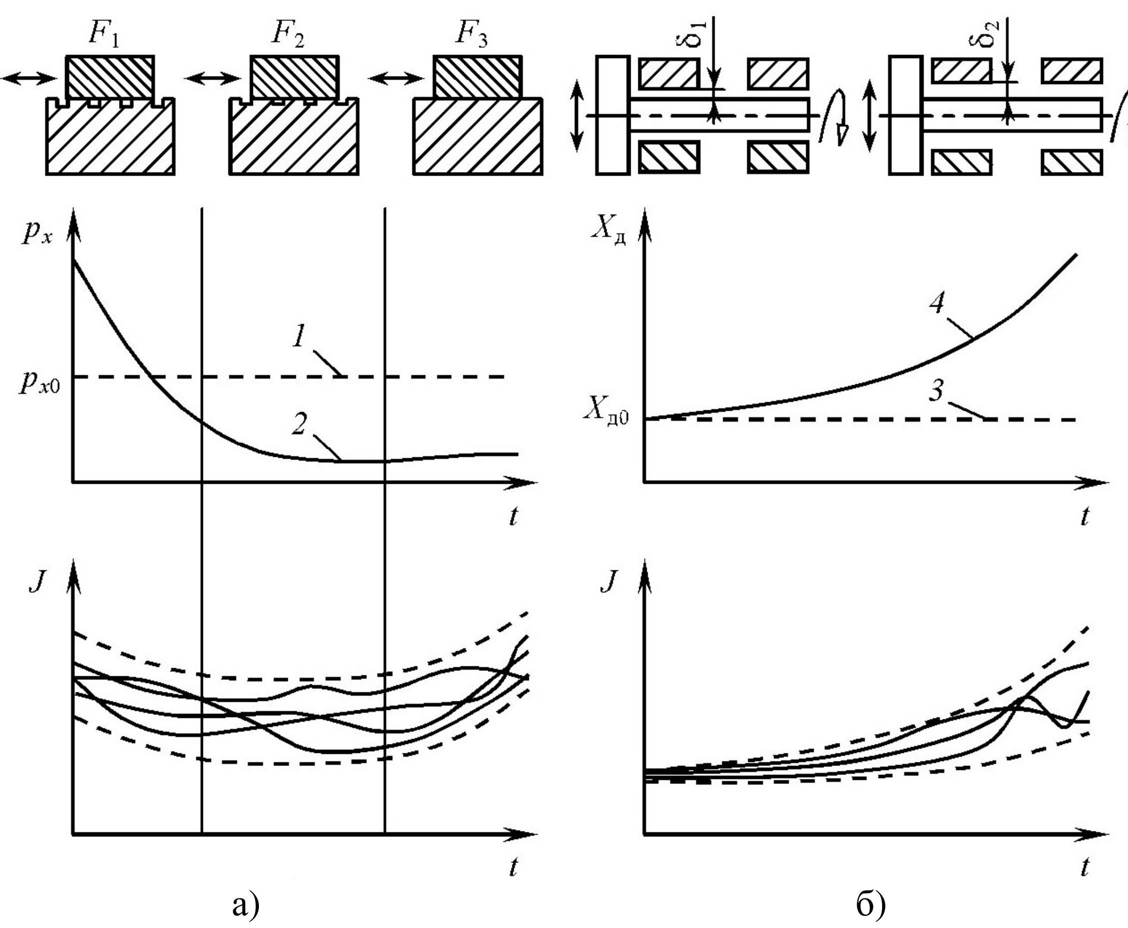
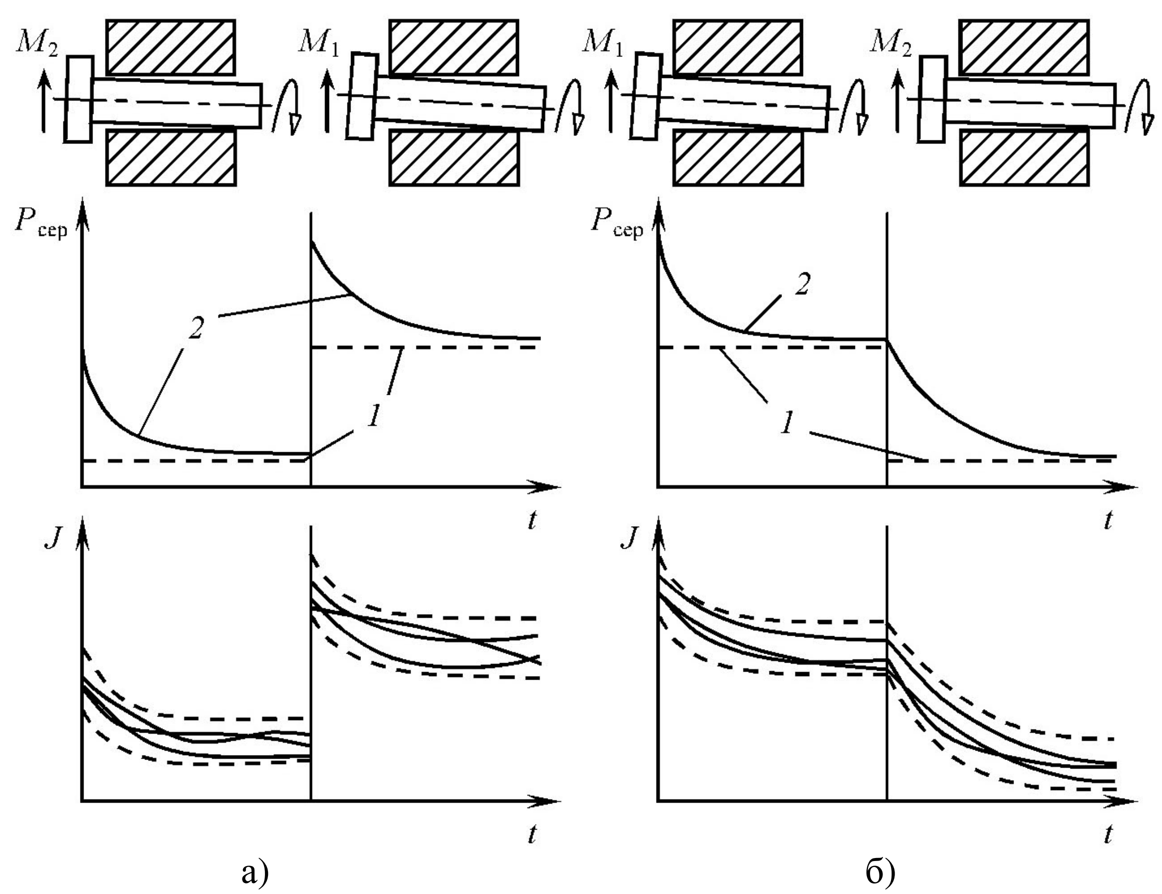


Рисунок 2.7 – Зміна у часі інтенсивності зношування J направляючих (а) та підшипників (б) з урахуванням зміни тиску $p_к$ у зоні тертя направляючих і динамічного навантаження $X_д$ у підшипниках у результаті зносу деталей:
1 – розрахунковий контурний тиск $p_{к0}$; 2 – дійсний контурний тиск з урахуванням збільшення в процесі зношування площі контакту F направляючих, $F_1 < F_2 < F_3$; 3 – розрахункове динамічне навантаження на підшипник; 4 – дійсне навантаження на підшипник з урахуванням динамічної складової, що залежить від величини зазору δ, $\delta_1<\delta_2$

На схемі, наведеній на рисунку 2.7, а (крива 1), показана тільки зміна контурної площі контакту *F* та пов'язаного з ним контурного тиску $p_к$ у шаброваних напрямних при їхньому зношуванні [17]. Дійсний контурний тиск (крива 2) може суттєво відрізнятися від результатів розрахунків без урахування величини і розподілу зношування по поверхнях тертя, які залежать від виду, величини й характеру зміни навантажувальних впливів з моменту початку роботи вузла тертя. Відповідно змінюється й інтенсивність зношування деталей у процесі роботи машини.

Зі зниженням тиску в зоні контакту зменшується інтенсивність зношування поверхонь. Однак у міру зношування деталей погіршуються умови тертя через зменшення обсягу шабрувальних западин, що є свого роду «резервуарами» для мастильного матеріалу, і накопичення в зоні контакту продуктів зношування. Все це сприяє збільшенню інтенсивності зношування поверхонь та підвищенню ймовірності виникнення задирів.



а) б)

Рисунок 2.8 – Зміна у часі інтенсивності зношування J підшипників при ступінчастому зменшенні (а) та збільшенні (б) згинального моменту *M*, який діє на вал, що обертається, (M_1>M_2):

1 – розрахунковий середній контурний тиск у зоні тертя; 2 – дійсний середній контурний тиск, що залежить від макрогеометрії зношеної поверхні

На рисунку 2.7, б показана зміна інтенсивності зношування підшипників ковзання при знакозмінному навантаженні з урахуванням збільшення через

зношування радіального зазору δ, яка приводить до виникнення додаткової складової динамічного навантаження. Необхідно відзначити, що виникаюче в підшипниках через зношування динамічне навантаження впливає на процеси втрати працездатності й інших вузлів механізму, кінематично пов'язаних з цими підшипниками. Тому в більшості випадків при оцінюванні довговічності машин необхідно розглядати їхні вузли, механізми й агрегати як «старіючі» динамічні системи, параметри котрих змінюються в процесі експлуатації.

Процес зношування із «загасаючою пам'яттю» показано на рисунку 2.8 [17]. Як приклад задано підшипник ковзання, що працює при ступінчасто змінному навантаженні. В цьому випадку кожному навантаженню відповідає певний розподіл зношування по поверхнях тертя, зумовлений пружним деформуванням елементів підшипникового вузла й переміщенням вала у зазорі. В початковий період роботи підшипника відбувається припрацювання деталей і формується «робоча» структура поверхневих шарів деталей, їх мікро- та макрогеометрія. При збільшенні або зменшенні діючого на вал згинального моменту M змінюється величина пружних деформацій деталей, вал займає нове просторове положення, а це приводить до перерозподілу епюри питомих тисків зон контакту деталей. Наступає так званий період «вторинного» припрацювання деталей. Тривалість цього періоду й величина припрацювального зносу залежать від розподілу накопиченого зносу по поверхнях тертя, зумовленого величиною й тривалістю дії попереднього згинального моменту. Після періоду «вторинного» припрацювання стирається «пам'ять» про величину і характер навантажень, що діяли раніше, яка відображається в особливостях розподілу зносу по поверхнях тертя й у структурі матеріалу поверхневих шарів. У період зношування, що встановився, інтенсивність руйнування поверхневих шарів зумовлена в основному величиною діючого в цей момент згинального моменту.

Таким чином, процеси втрати працездатності деталей і вузлів тертя машин спричинені всією послідовністю технологічних операцій при їхньому виготовленні, послідовністю й видом навантажувальних впливів під час експлуатації.

Взаємозв'язок параметрів якості об'єкта на різних стадіях його виготовлення й експлуатації представляється за допомогою комплексного графа (рисунок 2.9).

Вершини графа відповідають значенням параметрів об'єкта після певних технологічних операцій або після впливу певних експлуатаційних факторів. Наявність спадкового зв'язку по якому-небудь параметру показана у вигляді орієнтованого ребра графа, а відсутність – у вигляді неорієнтованого ребра. Коефіцієнти зміни параметра об'єкта або показника, що характеризує його працездатність, визначаються відношеннями [17]

$$T_{ljz} = h_{lj} / h_{lz}; E_{Ljz} = h_{Lj} / h_{lz}; ET_{Ljiz} = h_{Lj} / h_{lz}, \tag{2.16}$$

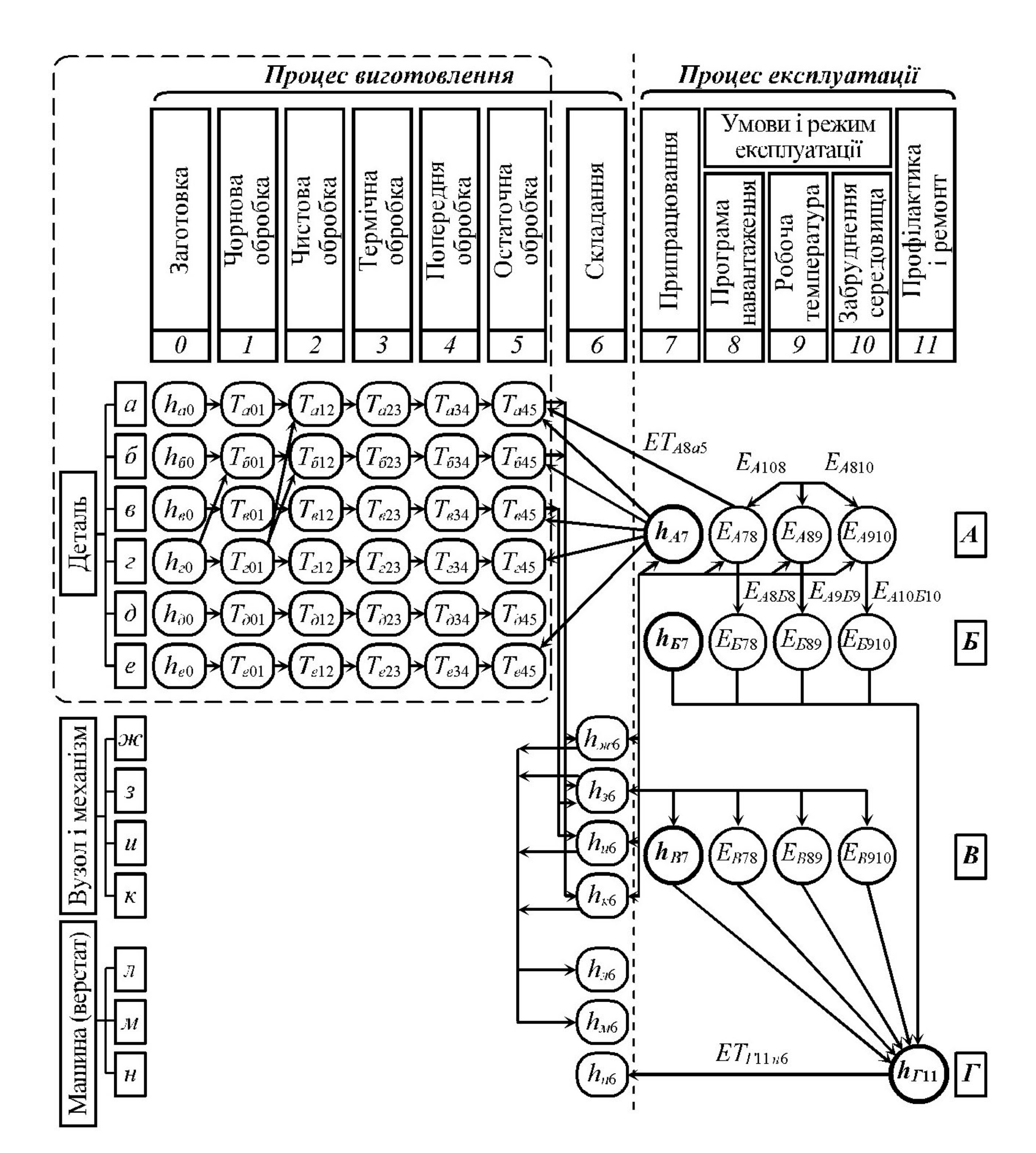


Рисунок 2.9 – Комплексний граф технологічного процесу виготовлення та експлуатації виробу з параметрами об'єкта: а – точність розмірів; б – макрогеометрія; в – мікрогеометрія; г – залишкові напруження; д – структура основного матеріалу; е – структура поверхневих шарів; ж – точність переміщення деталей; з – контактна жорсткість; и – температура у зоні тертя; к – зазори-натяги; л – точність обробки; м – якість обробленої поверхні; н – продуктивність і показники, що характеризують надійність об'єкта в експлуатаційних умовах; А – інтенсивність зношування; Б – напрацювання до відмови; В – напрацювання до втрати точності; Г – середній час відновлення

де T_{ljz} – коефіцієнт зміни l-го параметра деталі h_l при переході від j-ої технологічної операції до z-ої операції; E_{Ljz} – коефіцієнт зміни L-го показника надійності об'єкта h_l у результаті дії z-го експлуатаційного фактора після j-го фактора; ET_{Ljiz} – коефіцієнт зміни l-го параметра об'єкта h_l, отриманого на z-ій технологічній операції, у результаті зміни в процесі експлуатації L-го показника надійності h_l під дією j-го експлуатаційного фактора.

Найменше вивчені спадкові зв'язки, які позначені ребрами графа з коефіцієнтами ET_{ljz}, зумовлені впливом технологічної спадковості на експлуатаційну спадковість деталей, вузлів, механізмів і машин.

Опис процесу спадкування за допомогою системи рівнянь полегшує завдання кількісного визначення аналізованих властивостей.

2.6 Основні параметри деталі, що спадкуються

Поліпшення показників надійності машин і взагалі якості продукції, як правило, вимагає додаткових матеріальних витрат. Однак у кожному конкретному випадкові необхідно порівняти той економічний ефект, який дає виріб більш високої якості зі збільшенням собівартості його виготовлення. За результатами порівняння на підставі техніко-економічних розрахунків приймається рішення про необхідний рівень основних параметрів якості.

Параметри якості машин, що є основними, можна розділити на дві категорії. До першої відносять ті, які характеризуються спадковими явищами, пов'язаними із властивостями матеріалів машин, що виготовляються, до другої – пов'язані з їхніми геометричними показниками.

Параметри обох категорій тісно пов'язані й взаємно впливають один на одного. Геометричні показники виробів, їх конфігурація можуть впливати на напруження, що розподіляються в матеріалі та поверхневих шарах. І, навпаки, напруження, які отримують у ході технологічних операцій та стадій експлуатації, можуть із часом привести до змін геометричних показників високоточних деталей. Це говорить про взаємний зв'язок й обумовленість явищ, що супроводжують технологічний і експлуатаційний процеси.

Найбільш повно питання спадкування основних параметрів якості може бути вирішене при розгляді послідовності процесів із системних позицій.

При організації виробничої діяльності з підвищення якості машин на базі явищ технологічної спадковості головним є встановлення факту перенесення властивості від попередньої операції до наступної, а також кількісна сторона питання, що характеризується коефіцієнтами технологічної спадковості. Коефіцієнти спадковості b_i повинні визначати вибір технологічного маршруту. Технологічні впливи на операціях процесу мають характеризуватися коефіцієнтами a_i.

Якщо значення коефіцієнтів b_i у ході процесу залишається постійним, то цей факт має позитивне тлумачення лише в тому випадку, коли наслідувана властивість відіграє позитивну роль у питаннях якості виробів. Якщо коефіцієнт b_i коливається, то такий процес завжди повинен оцінюватися

негативно. Обов'язковою умовою доцільності технологічного процесу має бути монотонність зміни коефіцієнта спадковості b_i.

Негативна властивість, що виникла на певній операції процесу, повинна планомірно ліквідуватися. Позитивна ж властивість має не тільки зберігатися, але й розвиватися.

Технологічний процес при негативних властивостях повинен будуватися так, щоб на початкових операціях робота має проводитися з відносно більшим спадкуванням властивостей, а на кінцевих – з малим. Це відповідає економічному положенню про доцільність більш інтенсивної ліквідації негативних властивостей на початкових операціях, вартість проведення яких значно нижча від вартості кінцевих операцій технологічного процесу.

Початкові показники якості деталей машини в процесі експлуатації змінюються (рисунок 2.10) [17].

Показник якості виготовлення	Період процесу зношування		
	припрацювання	нормальне зношування	прискорене зношування
Точність розмірів і форма (неплощинність, некруглість та ін.)			
Хвилястість			
Шорсткість			
Залишкові напруження			
Структура основного матеріалу			
Структура поверхневих шарів			

Вихід деталі із ладу

Повне руйнування поверхні

Рисунок 2.10 – Схема зміни початкових показників якості деталей, що труться, у процесі експлуатації (заштриховані ділянки характеризують тривалість збереження початкових значень геометричних параметрів, залишкових напружень і структури матеріалу деталей у межах допустимих відхилень)

У більшості випадків уже в період припрацювання суттєво змінюється шорсткість і структура поверхневих шарів деталей, а хвилястість та геометрична форма поверхні тертя залишаються у межах допустимих значень,

прийнятих при виготовленні, практично до кінця служби вузла тертя, якщо оцінка його працездатності проводиться за параметрами точності. Залишкові напруження й структура основного матеріалу деталей можуть зберігатися до повного руйнування поверхонь, що труться.

У результаті конструкції машини, її вузлів і деталей усі операції технологічного процесу та стадії експлуатації повинні бути розглянуті з єдиних позицій забезпечення фізико-механічних властивостей матеріалу й геометричних показників якості поверхонь деталей (рисунок 2.11) [17].

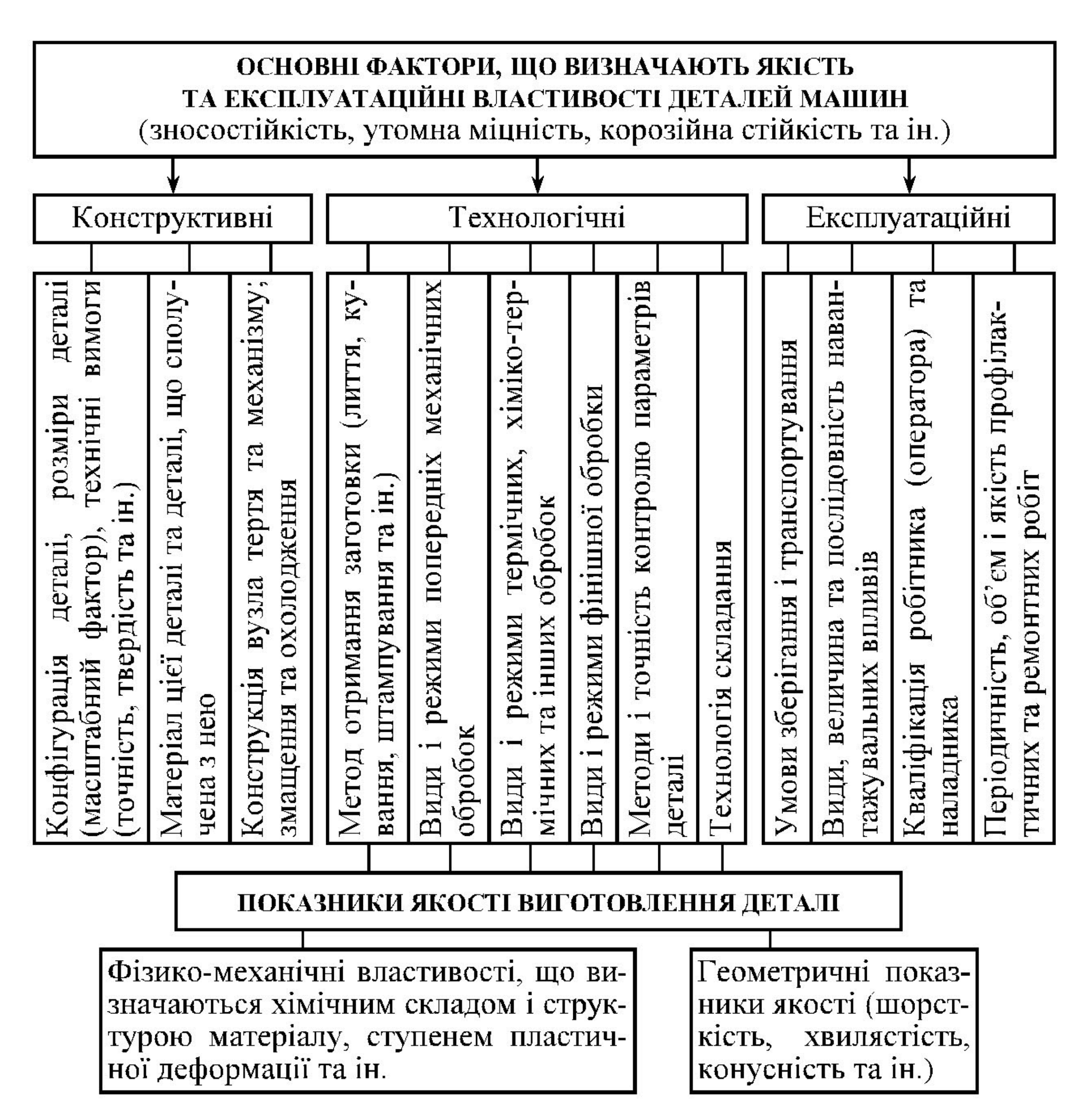


Рисунок 2.11 – Конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори, що визначають якість та експлуатаційні властивості деталей машин

2.7 Технологічна спадковість та її місце у підвищенні якості машинобудівних виробів

У практиці світового машинобудування відбувається постійне підвищення вимог до якості виробів, різко збільшуються швидкості, температури, точність та інші показники.

Для машинобудування одним з найважливіших є показник точності. При цьому поняття «точність» належить до розміру, форми, розташування поверхонь, твердості матеріалів та їх хімічного складу, шорсткості й ін. Об'єктивний процес постійного підвищення вимог до показників точності, помічений ще англійським натуралістом Дж. Берналом, можна простежити на прикладі зміни у двадцятому столітті точності розмірів у деталей машин (рисунок 2.12). На графіках, отриманих японськими вченими за результатами аналізу багатьох деталей, можна бачити, що «традиційна» обробка (графік 1) у наш час може стало проводитися з точністю 0,005–0,001 мм. «Надточна» ж обробка здатна забезпечити точність в 0,00005 мм (графік 3). Аналогічні графіки будуть характеризувати й інші показники виробів [23].

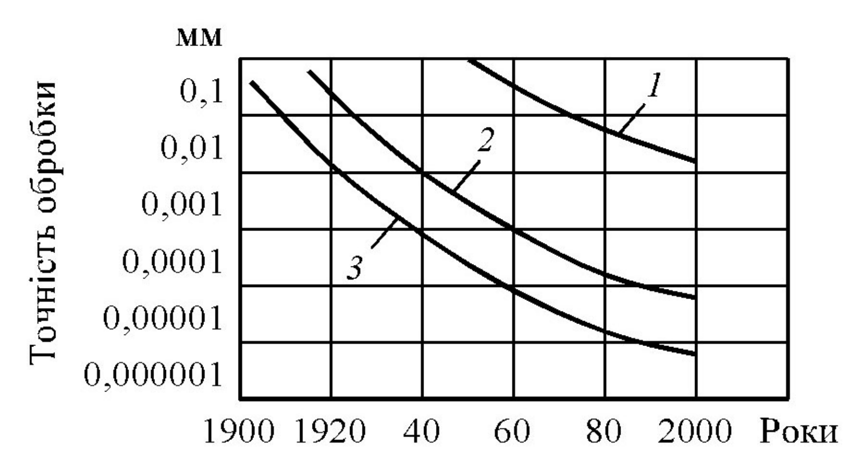


Рисунок 2.12 – Підвищення точності розмірів у минулому столітті:
1, 2, 3 – відповідно традиційна, точна та надточна обробка

Із рисунка 2.12 можна побачити, що у минулому столітті точність розмірів збільшилася приблизно в 2000 разів. Таких характеристик у машинобудуванні практично не спостерігається ні з одного іншого показника. Досягнення високих точностей при виготовленні деталей (насамперед – прецизійних) є найбільш важливою технологічною проблемою.

«Жорсткі» допуски, призначувані конструкторами й обчислювальні для прецизійних деталей мікрометрами, вже із труднощами забезпечуються за допомогою наявних технологічних систем. У цих системах обладнання виявляється лише складовою їх частиною, і думка про те, що високої точності можна досягти тільки за допомогою високоточних верстатів, є помилковою.

Найчастіше технологічні системи виявляються консервативними й не можуть «відпрацювати» команди керуючої програми або оператора. У цих умовах виникає проблема: точність постійно росте, а технологічні системи не

можуть її забезпечити. Необхідні нові резерви для забезпечення якості деталей і виробів.

Уже давно помічено, що окремі похибки, які виникають у ході технологічних процесів виготовлення деталей, виявляються дуже стійкими. Вони можуть з’явитися на початкових технологічних операціях і зберігатися аж до етапу експлуатації виробу. Елементарний приклад – наявність внутрішньої тріщини або іншого дефекту в матеріалі заготовки.

Сучасне машинобудування характеризується великою кількістю методів одержання заготовок, форма яких близька до форми деталей машин. Ці методи вирізняються високою продуктивністю, можливістю цілеспрямованого формування заданих фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів. Разом з тим такі заготовки у своїй масі не можуть відігравати роль деталей машин, тому що не мають необхідної геометричної точності, їх поверхні не можуть утворювати якісне сполучення двох об’єктів, а якість поверхневих шарів не забезпечує задані експлуатаційні вимоги.

Виробництво деталей машин здійснюється, як правило, на основі технологічних процесів обробки різанням, у ході котрих заготовки перетворюються в деталі машин. Таким чином, якість деталі, виражена через певні показники, являє собою сукупний результат умов формування як заготовок, так і обробки їх різанням.

Якість деталей у загальному вигляді являє собою сукупність властивостей і показників, які визначають придатність для задоволення певних потреб відповідно до їх призначення. Визначається якість дуже великою кількістю факторів. Природно, що на різних етапах розвитку машинобудування якісні показники суттєво різняться. Однак для машинобудування й приладобудування якість продукції щонайкраще оцінюється на основі експлуатаційних характеристик, тобто службових властивостей машин та їх деталей. Найчастіше оцінювання якості роблять за показниками надійності, динамічної якості, ергономічності й економічності експлуатації.

Практика машинобудування нагромадила досвід установлення експлуатаційних властивостей деталей. До таких властивостей відносять: зносостійкість, втомну міцність, контактну жорсткість, віброcтійкість, корозійну стійкість, міцність сполучень, щільність з’єднання, міцність зчеплення покриттів, обтічність газами й рідинами, тепловідбиття. Забезпечення цих та інших властивостей технологічними методами пов’язане з регламентуванням двох груп показників. До першої відносять показники геометричного, до другої – фізико-механічного характеру.

При обробленні заготовок різанням велика увага приділяється точності геометричних показників. Порівняно часто якість деталей оцінюють за точністю розміру. Для такої оцінки передбачений ціла низка вимірювальних засобів, серед яких є й унікальні – такі, що дозволяють оцінювати розмір з точністю до сотих часток мікрометра. Витримування заданого розміру із жорсткими допусками не становить таких технологічних труднощів, як забезпечення точності форми. Зокрема, у виробничих умовах виникають істотні за величиною відхилення від круглості. Вони безпосередньо позначаються на

якості з'єднань, котрі мають циліндричні поверхні, тому що по таких поверхнях установлюють відповідальні деталі й вузли машин і насамперед підшипники кочення, які через відхилення форми кілець можуть утратити свої початкові характеристики.

Умови формоутворення деталей виявляються настільки складними, що одночасно виникає кілька відхилень геометричного характеру: відхилення від циліндричності, перпендикулярності, паралельності та ін. Технологічне забезпечення геометричних параметрів у заданих межах є забезпеченням якості машини або її з'єднання. Так, у пари «вал – корпус» вал при поступальному русі не може переміщатися по прямолінійній траєкторії, якщо він має відхилення від циліндричності або якщо такі відхилення, у свою чергу має й отвір. Таким чином, геометричні відхилення деталей у цьому випадку не забезпечують заданої якості, наприклад, за параметром форми траєкторії переміщення.

Дуже важлива оцінка багатьох показників взаємного розташування поверхонь, що вирішальним чином впливає на якість машин. Назріла необхідність уточнення суті. Так, «відхилення» від співвісності» — це взаємне ув'язування осей двох і більш отворів, коли кожна з осей являє собою не пряму лінію, як це часто умовно приймають, а складну просторову криву. Поняття «вісь вала» (або отвору) повинне зв'язуватися з їхньою реальною поверхнею. В кожному поперечному перерізі вала або отвору розташовується свій центр, а вісь являє собою просторову криву, що проходить через зазначені центри. Аналогічний підхід необхідний при оцінюванні площинності або прямолінійності елементів деталей. Для кожного виду відхилень необхідні відповідні вимірювальні засоби, оскільки без кількісної оцінки відхилень мова про якість буде мати самий загальний характер. Звичайний кругломір буквально відкрив очі конструкторам і технологам на багато цікавих явищ, що зв'язують фізику відмови й технологію виготовлення деталі. Зараз уже використовують вимірювальні системи, котрі працюють як цифрові. Поки це найчастіше машини портального типу, що застосовують для корпусних деталей. Очікується подальше розроблення нових методів вимірювання й контролю, у першу чергу, оптичних методів, що дозволить мати надійне судження про геометричні показники деталей в умовах роботи машини в цілому.

Кількісна оцінка геометричних показників дає можливість керувати якістю в з'єднаннях деталей. Так, якщо одна з деталей, що сполучаються, має істотне відхилення від циліндричності, то при малих навантаженнях переміщення в стику виявляється приблизно в 1,5 разу більшим, ніж у з'єднаннях «ідеальної» форми. Якщо у кулькових підшипниках застосовувати тіла кочення II ступеня точності замість III, то довговічність підшипників збільшується приблизно на 30 %. Зниження рівня похибок форми робочих поверхонь підшипників з 2,5 до 1,0 мкм підвищує контактну витривалість приблизно в 3 рази. Збільшення точності форми шийок колінчастих валів з 10 до 6 мкм підвищує термін служби вкладишів підшипників у 2,5– 4 рази і т. д. [23].

У центрі уваги інженерів і вчених усього світу перебуває й інша геометрична характеристика, пов'язана із шорсткістю поверхонь деталей. Мікронерівності поверхонь, зумовлені технологічним процесом виготовлення деталей, вирішальним чином визначають якість з'єднання й машини в цілому. Вони є важливою складовою частиною поняття «якість поверхневого шару» і найбільш істотним чином впливають на такий показник якості, як зносостійкість. Якщо транспортна машина, що має масу 3–5 т утрачає в масі через зношування 3–4 кг, а підшипник кочення масою 10–14 кг утрачає 20–30 г, то такі вироби повністю втрачають свою працездатність. Шпинделі ж прецизійних верстатів, що мають масу порядку 10–12 кг уже не можуть експлуатуватися після зношування їх поверхонь на частки грама.

Реальна поверхня будь-якої деталі завжди недосконала. Геометричні відхилення поверхонь оцінюють, загалом, за відношенням кроку нерівностей до їхньої висоти. Залежно від числових значень цього відношення розрізняють шорсткість і хвилястість поверхонь. При значеннях зазначеного відношення понад 1000 відхилення вважають макроскопічними. Регламентування мікронерівностей повинне повністю підпорядковуватися задоволенню експлуатаційних показників деталей. Однак системи регламентування, розроблені в різних країнах, цій умові поки не відповідають. Кількість параметрів оцінювання шорсткості виявляється різною. Так, у Франції і Данії шорсткість оцінюється за 10 параметрами, в Італії – за 7, у Німеччині — за 6, у Чехії – за 3, а в Японії – за одним. У Росії таке оцінювання проводиться за 6 параметрами.

Призначення параметрів шорсткості, проведене конструктором, безпосередньо пов'язане з якістю деталей машин. Сучасна система оцінювання шорсткості, представлена ГОСТом, дозволяє призначати шорсткість залежно від експлуатаційної властивості деталі. Для деталей, що працюють в умовах зношування, найбільш важливими характеристиками є: середнє арифметичне відхилення профілю, середній крок нерівностей профілю за середньою лінією й відносна опорна довжина профілю. Для деталей, що працюють в умовах знакозмінного навантаження, найбільш важливою є найбільша висота профілю, а для забезпечення високої міцності зчеплення з покриттям – висота нерівностей профілю за десятьма точками. Особливо передбачається напрямок слідів обробки на поверхнях деталей, а також взаємне розташування цих слідів на поверхнях, що сполучаються.

Незважаючи на широкі можливості керування якістю деталей за рахунок раціонального вибору характеристик шорсткості поверхонь, система його оцінювання ще не використовується повною мірою, особливо в частині розумного комбінування різних характеристик, передбачених ДСТУ. З іншого боку, призначення методів обробки деталей залежно від заданих характеристик шорсткості виявляється справою надзвичайно складною. Для практичних цілей кількісні залежності виникаючої після обробки шорсткості й умов обробки одержують двома методами: теоретичним методом поглиблених досліджень фізичних явищ, що відбуваються в поверхневому шарі при обробці, й шляхом спеціальних спланованих статистичних експериментальних досліджень. Другий

метод вимагає менших витрат і дозволяє одержати результати у вигляді статистичних моделей. Такі моделі вже розроблені для всіх основних методів механічної обробки заготовок.

При всій досконалості системи оцінювання геометричних параметрів поверхонь деталей не можна не помітити однієї важливої особливості. Параметри встановлюються відповідно до інформації по одній трасі вимірювання деталі або зразка. Друга траса вимірювання може дати інші параметри. Тому необхідно підсилити увагу до топографії поверхонь. Саме топографія поверхні, а не один який-небудь її перетин, дає змогу пролити світло на формування відмови, тобто повніше оцінити якість деталі. Мікротопографічні карти поверхонь дозволяють правильно представити їх взаємодію в конкретних умовах. Але в цьому напрямі треба буде виконати ще дуже багато роботи, насамперед щодо створення серійних приладів для оцінювання топографічних параметрів.

Поверхневий шар будь-якої деталі завжди відрізняється від основного матеріалу. Умови попередньої обробки, особливості впливу інструмента й навколишнього середовища, а також дія інших причин певним чином фіксується у поверхневому шарі. Комбінація поверхневого шару й основного матеріалу може розглядатися як своєрідний композит. Подібне уявлення про шар тим більше доцільне, оскільки стало можливим впливати на поверхню, що в свою чергу змінює її властивості: створення захисних оксидних плівок, уведення мікродобавок легуючих елементів для одержання особливих захисних властивостей поверхонь, наприклад, за рахунок іонної імплантації. Найважливішим показником фізико-механічних властивостей поверхневих шарів є залишкові напруження. Вид і режими технологічного впливу визначають знак, величину й картину розподілу залишкових напружень. Розтягувальні напруження найчастіше негативно впливають на експлуатаційні характеристики. В цьому випадку якість деталей, що працюють в умовах знакозмінного навантаження та мають розтягувальні напруження поверхневих шарів, виявляється особливо низькою. Для таких деталей необхідне технологічне формування стискаючих залишкових напружень, що досягається спеціальною зміцнюючою технологією.

Якість високоточних деталей забезпечується невисоким рівнем залишкових напружень, оскільки із часом без впливу зовнішніх навантажень початкова форма цих деталей не повинна відчутно змінюватися. На практиці це положення часто ігнорується. Придатна, видалося б, за всіма параметрами деталь через певний час уже у зібраній машині, яка перебуває в стадії зберігання і не навантажена, виявляється некондиційною. При впливі на такі деталі експлуатаційних навантажень якість їх падає значно швидше. Так змінні у часі залишкові напруження в циліндрах автомобільних і авіаційних двигунів приводять до овалізації циліндрів. Збільшення овальності наростає дуже швидко. При досягненні для певних двигунів значення овальності понад 30 мкм відбувається скорочення терміну служби двигунів у 1,5–2,0 рази. Аналогічний процес спостерігається при роботі машин, що мають з’єднання «вал – підшипник ковзання», коли відхилення форми приводять до зміни товщини

масляного шару й при обертанні з постійною кутовою швидкістю – до різкого зниження якості.

У цілому оцінювати якість деталей за параметром залишкових напружень буває конче потрібно, і така оцінка видається дуже важливою для деталей машин різного призначення. Труднощі ж оцінки пов'язані з наявністю в тонкому поверхневому шарі напружень обох знаків і різного рівня.

Важливим показником якості деталей є їх твердість. Вона суттєво може змінитися в процесі різання, тому що поверхневий шар наклепується, а його твердість підвищується. Пружнопластичне деформування й нагрівання поверхневих шарів приводять до структурних і фазових перетворень. Останні також є важливим показником якості.

Відзначені показники, що мають для машинобудування найважливіше значення, можна назвати макроскопічним. Разом з тим, останнім часом оцінювання якості поверхневого шару все частіше й частіше проводиться з урахуванням складних явищ, що відбуваються на атомному рівні. Поділ якісних показників поверхневого шару на геометричні й фізико-механічні виявляється умовним. Власне поверхня є вкрай неоднорідною в усіх відношеннях. Схарактеризувати докладно поверхневий шар поза його хімічною природою вже не можливо.

Якість поверхневого шару поряд з топографією незмінно зв'язується з його елементним складом, а також із градієнтом цього складу, молекулярним складом, структурою. Із практичної точки зору, необхідно встановлювати зв'язки і кількісні співвідношення показників поверхневого шару й режимів його обробки. Цьому сприяє поява цілої низки методів оцінювання елементного складу й хімічних зв'язків. Особливу роль тут відіграє метод електронної спектроскопії для хімічного аналізу поверхневих шарів деталей. Електрони, які несуть інформацію про якісні показники, виходять із товщини шару менше ніж 0,01 мкм, що дозволяє досить глибоко вивчати явища, що відбуваються при обробці шару й зміни його властивостей залежно від конкретних умов. У зв'язку із цим слід очікувати в недалекому майбутньому збільшення числа показників якості поверхневого шару й методів його оцінювання.

Використовуючи термінологію з галузі живої природи, можна вважати, що в технології машинобудування багато показників мають спадкову природу. Тому правомірним є використання поняття «технологічна спадковість».

Усі об'єкти машинобудування – деталі й вироби в цілому – мають відповідні показники якості. Ці показники встановлюють, виходячи зі службового призначення об'єктів. Для одних головними є розміри, для інших – шорсткість поверхні або форма, напруження поверхневих шарів, взаємне розташування поверхонь і т. п. Похибки обробки й складання виникають завжди. Виробів без відхилень від номінального значення показника якості не буває. Однак будь-яке відхилення повинно перебувати у допустимих межах – допусках.

У технології машинобудування важливо не тільки визначити кількісно це відхилення, але й установити, чому саме воно з'явилося, які умови сприяли

його виникненню, як це відхилення формувалося протягом усього технологічного процесу.

Інформація про історію виникнення кожного відхилення важлива тому, що з її допомогою стає можливим впливати на величину відхилення й тим самим підвищувати показники якості машинобудівних виробів. Тому в процесі створення виробів, починаючи з вибору матеріалу для заготовки конкретної деталі, обробки заготовки тощо, виникає необхідність розгляду виробничого процесу виготовлення виробу в часі. При цьому з'являється й поняття про технологічну спадковість.

Технологічним спадкуванням називається явище перенесення властивостей об'єктів від попередніх технологічних операцій до наступних. Ці властивості можуть бути як корисними, так і шкідливими. Збереження ж цих властивостей в об'єктів називають ***технологічною спадковістю***. Такі терміни є досить ємними. За їх допомогою і відповідних методик можна простежити за станом об'єкта виробництва в будь-який момент часу з урахуванням усіх попередніх технологічних впливів. У процесі передачі властивостей важливу роль відіграє так звана ***спадкова інформація***. Вона міститься в матеріалі деталей і поверхневих шарах цих деталей. Інформація являє собою великий перелік показників якості.

Вивчення явищ технологічної спадковості сприяє підвищенню надійності роботи реальних деталей, оскільки дає можливість установити причини явищ і умови регулювання параметрів технологічних процесів, у ході яких формуються властивості цих деталей.

Дуже суттєвим є встановлення загальних закономірностей технологічного спадкування – визначення кількісної сторони технологічного спадкування таких параметрів, як конструктивні форми заготовок і деталей, похибок технологічних баз, похибок форми й просторових відхилень заготовки, їх хвилястості, фізико-механічних властивостей поверхневих шарів та ін. Винятково велике значення мають спадкові похибки при складанні.

Науковий аналіз питань технологічного спадкування поки не дістав у технічній літературі досить повного відображення. Навіть сам термін «технологічна спадковість» не має значного поширення, хоча в механіці вже порівняно давно оперують поняттями «спадково-пружне» і «спадково-пластичне» середовище. Явище спадкування може бути ілюстроване за допомогою теорії графів та виражене системою простих рівнянь. Загальний підхід до розв'язання задач якості виробів на базі технологічної спадковості з успіхом може бути використаний у машинобудівному виробництві [23].

Технологічна спадковість передбачає взаємозв'язок окремих елементів системи. Під ***системою*** можна розуміти як технологічний процес, так і сам об'єкт обробки. В останньому випадку система може складатися з мікроелементів матеріалу, певним чином розташованих на поверхні й у глибинних шарах, з геометричних параметрів поверхонь, з їх розмірів і т. д. Однак у всіх випадках система являє собою замкнене ціле. Тому для опису поведінки системи можливе використання принципів кібернетики, яка є головним інструментом дослідження систем. Система, що розглядається з

позицій технологічної спадковості, не розрізнене скупчення окремих елементів, а міцно зв’язана інформаційна мережа. Тому не має сенсу розглядати окремо взяті, відокремлені стани оброблюваного об’єкта. Такий підхід не дозволяє встановити зв’язки всередині системи.

Явище технологічної спадковості за своєю суттю досить складне. Нехай, наприклад, система складається з n елементів. Якщо не використовувати системного підходу до оцінки явища, то необхідно виконати n окремих досліджень. Але якщо описується система в цілому, то необхідно досліджувати не тільки n елементів, але й $n(n-1)$ зв’язків між ними. Нехай розглянута система має 7 елементів. Усередині такої системи існує 42 зв’язки. Якщо визначити стан системи ланцюгом, у якому кожен із цих зв’язків реалізований або відсутній, то число різних станів, у яких може перебувати система, що становить фантастично велике число, рівне 2^{42}.Відзначимо також, що розглянуті системи перебувають у динамічному режимі, тобто функціонують, переходять із одного стану в інший за певний час. Ця обставина робить розв’язання задач із виявлення спадкових зв’язків ще складнішою. Такі системи дуже різноманітні, отже, характеризуються великою невизначеністю. Однак наявність спадкової інформації, що є найважливішою особливістю таких систем, зменшує різноманітність, спрощує систему. Більше того, стає можливим прогнозувати поведінку системи.

Носіями спадкової інформації є власне матеріал високоточної деталі, а також її поверхні з різноманіттям параметрів, що описують стан цих поверхонь. Носії інформації беруть активну участь у технологічному процесі, проходячи, за висловлюванням академіка П.І. Ящерицина, через різні «бар’єри» або затримуючись на них частково чи повністю. Найбільш суттєвим «бар’єром» є термічні операції. Відхилення фактичної форми заготовок від ідеальних повністю певним чином передаються від однієї операції до іншої. В окремому випадку це явище може бути назване ***копіюванням***. У ході процесу різні вади поверхонь деталей, зокрема мікротріщини, можуть розвиватися або «заліковуватися» і т. д. У всіх цих та аналогічних випадках виникнення, зміна, ліквідація параметрів високоточної деталі характеризуються спадковою інформацією.

Спадкування властивостей у ході технологічного процесу характерно як для детермінованих, так і для імовірнісних систем. У першому випадкові не виникає ніякої невизначеності в передачі властивостей. Якщо відомі попередній стан системи й спосіб переробки інформації, то можна передбачити її наступний стан, як, наприклад, для випадків технологічного спадкування конструктивних форм заготовок. Для імовірнісної системи не можна зробити точного, детального пророкування. Можна лише з великим ступенем імовірності визначити, які будуть спадкові властивості системи. Проте визнання того, що ця система є детермінованою або імовірнісною, не може вирішально вплинути на розуміння сутності технологічної спадковості. Явище, що розглядається, неодмінно пов’язане зі станом системи та її змінами у часі.

Є підстави стверджувати, що процесом технологічного спадкування можна керувати, для того, щоб властивості, які позитивно впливають на надійність

деталі, зберігати протягом усього технологічного процесу, а властивості, які впливають негативно, – ліквідувати на його початку. Отже, у загальному вигляді не можна однозначно відповістити на запитання про те, до яких явищ належить технологічна спадковість – до позитивних або негативних. Чітка відповідь тут може бути надана лише стосовно конкретного технологічного процесу.

Перед технологією машинобудування як наукою стоїть досить важке завдання детального й комплексного аналізу умов виробництва та встановлення кількісної сторони технологічного спадкування. На практиці це означає, що властивості машинобудівних виробів, які знижують їх якість, повинні бути ліквідовані в першу чергу на заготівельних або початкових операціях механічної обробки, а властивості, що забезпечують підвищення якості, збережені й розвинені до кінцевої стадії виробництва – складання.

РОЗДІЛ 3
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ МАШИНОБУДІВНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Фізико-механічні властивості матеріалів

При виборі конструкційного матеріалу виходять із комплексу властивостей, які підрозділяють на механічні, фізичні, хімічні, технологічні та експлуатаційні [24, 25, 26]. Властивості ці залежно від характеру навантаження по-різному проявляються у статичних і динамічних станах.

Так при статичному, або однократному, впливі навантаження механічні властивості розрізняють [27] за:

− видом (розтягування, стискання, згин, кручення);
− часом прикладання навантаження (постійне, змінне);
− впливом геометрії (у надрізі, поза надрізом);
− температурними умовами (низька, висока температура);
− впливом середовища (корозія, адсорбція).

При динамічному навантаженні в умовах змінного навантаження властивості розрізняють за:

− видом навантаження;
− геометрією;
− температурою;
− впливом середовища.

Тимчасова форма навантаження, що встановилося, підрозділяється у цих випадках за:

− частотою;
− середнім, базисним навантаженням;
− величиною, формою та послідовністю амплітуд.

До основних механічних властивостей відносять [8, 9, 26]: пружність, пластичність, міцність, в’язкість, повзучість, твердість і зносостійкість, що визначаються напруженнями та деформаціями матеріалу під впливом навантаження (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні механічні властивості матеріалів

Властивість	Визначення
1	2
Напруження, σ	Міра внутрішніх сил, що виникають у матеріалі, який деформується, під дією зовнішнього впливу. Сила на одиницю площі $\sigma = F / S_0$
Деформація, ε	Характеристика зміни розмірів та форми тіла. Відносна деформація $\varepsilon = \Delta l / l$

Продовження таблиці 3.1

1	2
Пружність (модуль пружності Юнга), E	Здатність тіла відновлювати свої розміри та форми. Коефіцієнт пропорційності між пружним напруженням і відповідною деформацією $$E = \sigma / \varepsilon$$
Міцність, $\sigma_{руйн}$ Межа текучості: - фізична, $\sigma_т$; - умовна, σ_{02} Опір тимчасовий, $\sigma_в$	Здатність матеріалу опиратися деформуванню та руйнування $$\sigma_{руйн} = F_{руйн} / S_0$$ Напруження, що призводять до появи: незворотної деформації $$\sigma_т = F_т / S_0;$$ залишкової деформації 0,2% $$\sigma_{0,2} = F_{0,2} / S_0$$ Максимальне напруження, що спричиняє руйнування: $$\sigma_в = F_{\max} / S_0$$
Пластичність: - відносне видовження, δ; - звуження поперечного перерізу, ψ	Здатність тіла змінювати без руйнування форми і розміри під впливом навантаження, стійко зберігаючи форми та розміри, що утворилися, після припинення цього впливу $$\delta = (l - l_0) / l_0;$$ $$\psi = (S_0 - S) / S_0$$
В’язкість (ударна в’язкість), $a_н$	Відношення роботи руйнування при ударному навантаженні до площі поперечного перерізу зразка у місці надрізу $$a_н = A_н / S$$
Твердість, H: - за Брінеллем, *HB* - за Роквеллом, *HR* - за Віккерсом, *HV* (мікротвердість), $H\mu$	Здатність матеріалу опиратися проникненню у нього іншого тіла Відношення постійного навантаження 3 000 кГс до величини відбитка сталевої кульки діаметром 10 мм після навантаження протягом 10 с Глибина вдавлювання наконечника при постійному навантаженні. Для шкал *A*, *B*, *C* відповідно 50, 90, 140 кГс Визначається за довжиною діагоналі відбитка індентора у вигляді алмазної піраміди
Зносостійкість	Здатність матеріалу опиратися поверхневому руйнуванню та деформуванню під дією зовнішнього тертя. Визначається величиною оберненою швидкості або інтенсивності зношування

До основних **фізико-хімічних властивостей** матеріалів належать [8, 9, 26]: густина, температури фазових переходів, тепло- та електропровідність, теплоємність, коефіцієнти теплового розширення, діелектрична і магнітна проникність, а також антикорозійні властивості й здатність до хімічної взаємодії з агресивними середовищами (таблиця 3.2). Перераховані властивості багато у чому визначаються хімічним складом компонентів сплаву та їх структурою.

Таблиця 3.2 – Основні фізико-хімічні властивості матеріалів

Властивість	Визначення
1	2
Густина, ρ	Відношення маси матеріалу до об'єму, що займається
Температура, θ	Термодинамічна величина, яка характеризує стан тіла при термодинамічній рівновазі
Теплоємність, C	Відношення кількості теплоти, що передана тілу, до відповідного підвищення температури
Теплопровідність (коефіцієнт тепло-провідності), λ	Здатність матеріалу передавати теплоту, визначається кількістю теплоти, що переноситься через одиницю поверхні за одиницю часу при одиничному градієнті температур
Теплове розширення (коефіцієнт лінійного, об'ємного розширення), α	Відносна зміна розмірів, об'єму при зміні температури на один градус
Питома електро-провідність, γ	Перенесення електричного заряду під дією зовнішнього поля. Визначається відношенням густини струму до напруженості поля
Діелектрична проникність, ε_0	Коефіцієнт пропорційності між електричною індукцією та напруженістю електричного поля
Магнітна проникність, μ_0	Коефіцієнт пропорційності між магнітною індукцією та напруженістю магнітного поля

3.2 Властивості, що визначають можливість застосування матеріалів у машинобудуванні

Властивості конструкційних матеріалів умовно підрозділяють на [9, 24]: структурно-нечутливі й структурно-чутливі (таблиця 3.3).

Структурно-нечутливі властивості практично не залежать від ступеня недосконалості будови або структури матеріалу, що проявляється при тому або іншому виді обробки.

Структурно-чутливі властивості залежать не тільки від виду матеріалу, але й від ступеня досконалості його будови, від виду термообробки конкретного виробу і від інших технологічних та експлуатаційних впливів.

Технологічні властивості металів і сплавів характеризують їх здатність піддаватися різним видам обробки [9, 24]. До основних із них відносять: ливарні властивості, ковкість, зварюваність і оброблюваність різальним інструментом.

Таблиця 3.3 – Структурна чутливість характеристик та властивостей матеріалів

Характеристики матеріалів	Властивості матеріалів	
	структурно-нечутливі	структурно-чутливі
Механічні	Густина, модуль пружності	Міцність, опір руйнуванню, пластичність, твердість
Термічні	Теплове розширення, теплоємкість, теплопровідність, в'язкість у рідкому стані, температура плавлення	Ударна в'язкість, зносостійкість
Електричні	Питома електропровідність, електрохімічний потенціал, термоелектричні властивості	Електропровідність напівпровідників та електропровідність матеріалів при низьких температурах
Магнітні	Парамагнітні та діамагнітні властивості	Феромагнітні властивості, магнітострикція

Ливарні властивості характеризують здатність металу або сплаву заповнювати лінійну форму, забезпечувати одержання виливка заданих розмірів і форм без пор та тріщин в усіх його частинах.

Ковкість – здатність матеріалу деформуватися з мінімальним опором під дією зовнішнього прикладеного навантаження та приймати задану форму. Ковкість залежить від зовнішніх факторів: схеми напруженого стану, температури нагрівання й ін.

Оброблюваністю називають властивість металу піддаватися обробці різанням. Критеріями оброблюваності є параметри режимів різання та якість поверхневого шару.

Зварюваність – здатність матеріалу утворювати нероз'ємні з'єднання з комплексом властивостей, що забезпечують працездатність конструкції. За ступенем зварюваності матеріали підрозділяються на такі, що добре й обмежено зварюються. Зварюваність залежить як від матеріалу заготовок, що зварюються, так і від вибраного технологічного процесу зварювання.

Показники технологічних властивостей визначають спеціальними випробуваннями на оброблюваність, зварюваність, ковкість, а також ливарними пробами.

3.3 Конструкційна міцність деталей

У машинобудуванні склалася практика – основою надійності вважати конструкційну міцність вузлів і деталей. До структурного складу конструкційної міцності входять [8, 28]: конструкція та розрахунки на міцність, властивості матеріалів, технологія виготовлення, експлуатація.

Конструкційна міцність – це міцність у реальних умовах експлуатації з урахуванням конструктивних, металургійних, технологічних та експлуатаційних факторів, які становлять єдність, що визначає надійність виробу [8, 29].

Проблема властивостей матеріалів – одна з визначальних у забезпеченні конструкційної міцності. Виходячи з єдності складових конструкційної міцності дослідження властивостей матеріалів проводять із урахуванням впливу конструкції (напруженого стану, концентрації напружень, форми зразка), технології (виду заготовки, термічної обробки, механічної й зміцнюючої обробки, зварювання) та експлуатаційних умов (температури середовища, режимів і характеру навантаження, багатокомпонентності навантажень), тобто в умовах, максимально наближених до реальних.

У загальній системі конструкційної міцності й надійності важливу роль відіграє технологічна надійність. Технологія виготовлення вузлів і деталей, яка розвивається разом з удосконаленням конструкції, за своїм рівнем повинна відповідати зростаючим вимогам до їх якості. Технологічна спадковість при виконанні різних операцій механічної обробки, зварювання, паяння, термічної обробки, поверхневого зміцнення й інших впливає на параметри структури матеріалу і поверхневого шару деталі (таблиця 3.4). Установлено, що більшість технологічних операцій (шліфування, паяння, зварювання та ін.) супроводжуються негативними явищами, які повинні враховуватися при формуванні технологічного процесу.

Таблиця 3.4 – Основне призначення процесу (*Н*) та фактори, що впливають на технологічну спадковість

Спосіб обробки	Геометрична форма	Макро- та мікроструктура	Структура фазового складу	Хімічний склад	Наклеп	Залишкові напруження	Несуцільності	Включення
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Механічна обробка (лезова)	Н	Н	-		+/-	+/-	-	-
Шліфування	Н	Н	-	-	+	-	-	-

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Доведення	Н	Н			+	+		-
Дробоструминна обробка та інші методи зміцнення	-	+/-	+		Н	Н		-
Гальванічна обробка		-		+		-	-	-
Електрополіруваня	-	Н		+				
Піскоструминна обробка	-	Н			+	+		-
Паяння	-	-	Н	-		-	-	-
Зварювання	-	-	Н	-		-	-	-
Лиття	Н	Н	Н	-		-	-	-
Термічна обробка	-		Н	-		-		
Хіміко-термічна обробка	-	-	Н	Н		-	-	-
Гаряче деформування	Н	-	-	-		-	-	-
Холодне деформування	Н	Н	+		+/-	+/-		
Штампування листа, гнуття	Н	-			+/-	+/-		
Позначення: «+» – фактори, що впливають позитивно, «–» – фактори, що впливають негативно								

Особливо важливим параметром технологічної надійності є залишкові напруження в поверхневому шарі [8].

Підвищення технологічної надійності шляхом упровадження нових матеріалів іде в напрямі поліпшення механічних і фізичних властивостей, створення матеріалів із цілеспрямованими властивостями й розроблення нових технологічних процесів одержання заготовок [8, 9].

При розгляді конструкційної міцності слід ураховувати, що поверхня деталі перебуває в найбільш несприятливих умовах.

Відомо, що атоми поверхневого шару кристалів унаслідок відсутності міжатомних зв'язків з однієї сторони зміщуються зі своїх нормальних положень у кристалічних ґратках. На поверхні тіла виникають атомні структури з іншою симетрією, щільністю атомів і типом міжатомних зв'язків. Вільна поверхня як границя двох фізичних середовищ створює сприятливі умови для утворення та руху дислокацій, які відбуваються при більш низькому рівні напружень. Таким чином, поверхневий шар незалежно від фізико-механічних властивостей сплаву є слабким елементом деталей.

Експлуатаційні фактори (температура, газова корозія, ерозія, вигорання легуючих елементів, контактні явища) насамперед стосуються також поверхні й впливають на неї.

Внутрішні дефекти і недосконалості кристалічних ґраток під впливом експлуатаційних факторів намагаються вийти на поверхню.

Крім того, у більшості типових схем навантаження (згинання, кручення, внутрішній тиск) максимальні напруження виникають на поверхні деталей. Навіть при розтяганні внаслідок стиснення деформації в середній частині елемента конструкції, насамперед, пошкоджується його поверхня. Це підтверджується результатами випробувань зразків з різним відношенням периметра перерізу до його площі. Зразки з відносно більшим периметром (тобто з більшою поверхнею) мають менші значення міцності.

Параметри, що визначають конструкційну міцність матеріалів, укрупнено можна розділити на дві групи: короткочасні й довгострокові, тобто характеристики, пов’язані із тривалістю навантаження [8, 29]. До першої групи відносять: тимчасовий опір, границю текучості, відносне подовження при розриванні, відносне звуження при розриванні, ударну в’язкість, ударну в’язкість зразка із тріщиною, коефіцієнт інтенсивності напружень тощо, які становлять набір стандартних характеристик, що визначають опір матеріалу діючим навантаженням при однократному їх прикладанні.

Більш істотними для забезпечення надійності й ресурсу є характеристики, що залежать від тривалості навантаження: тривала міцність, повзучість і релаксація напружень, багатоциклова і малоциклова втома, контактна витривалість, швидкість розвитку тріщини при циклічному навантаженні, термостійкість, знос, корозійна стійкість, корозія під напругою, здатність до вповільненого руйнування й ін. [8].

У системі дослідження конструкційної міцності матеріалу кожний з параметрів визначають із урахуванням конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів (таблиця 3.5) [8].

3.4 Міцнісні властивості матеріалів

Теоретичні передумови показують, що найбільша міцність матеріалів може бути досягнута в бездефектних кристалах.

Теоретична міцність на відрив за оцінкою Орована [9]

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{\gamma_0 E}{a_0}}, \qquad (3.1)$$

де E – модуль пружності; γ_0 – поверхнева енергія; a_0 – відстань між площинами кристалу, по яких відбувається відривання.

Отже, високоміцні та зносостійкі матеріали знаходяться серед речовин з високим модулем пружності та поверхневої енергії, а також з якомога більшим

числом атомів на одиницю об’єму. Теоретична міцність на відрив у заліза – $4{,}6\cdot10^4$ МПа, вольфраму – $8{,}6\cdot10^4$ МПа, алмазу – $20{,}5\cdot10^4$ МПа.

Таблиця 3.5 – Конструкційна міцність матеріалів

Досліджувані характеристики	Конструкція			Технологія						Експлуатація						
	Концентрація напружень	Форма зразка	Напружений стан	Вид заготовки	Термічна обробка	Механічна обробка	Зміцнююча обробка	Електрохімічна обробка, покриття	Зварювання	Температура	Середовище	Режими навантаження	Частоти навантаження	Асиметрія циклу	Двохчастотне навантаження	Багатокомпонентне навантаження
Стандартні $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, δ, ψ, $a_н$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
Тривала міцність, повзучість, релаксація	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x
Малоциклова втома	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Втома	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Термостійкість	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
Знос та контактна витривалість		x		x	x	x	x	x		x	x	x	x			
Корозійна стійкість		x		x	x	x	x	x	x	x	x					x
Живучість	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Позначення: x – досліджено																

Теоретична міцність на зсув за оцінкою Френкеля [9]

$$\tau_{\max} = \frac{G \cdot b}{2\pi \cdot a_c}, \tag{3.2}$$

де G – модуль зсуву; b – відстань між атомами в напрямку зсуву; a_c – відстань між площинами зсуву.

Отже, високоміцні матеріали знаходяться серед речовин із високим значенням модуля зсуву. Теоретична міцність на зсув у заліза – $0{,}66 \cdot 10^4$ МПа, вольфраму – $1{,}6 \cdot 10^4$ МПа, алмазу – $12 \cdot 10^4$ МПа.

Бездефектні кристали мають ще одну перевагу: пружна деформація їх велика й становить кілька відсотків.

Міцність на зсув завжди менша, ніж міцність на відрив, причому відношення τ_{max}/σ_{max} найменше для металевих матеріалів. Найбільше значення τ_{max} мають речовини з направленим характером зв’язку, а саме: кристали з ковалентними зв’язками та кристали із сильно поляризованими іонними зв’язками, причому структура їх повинна мати високу щільність міцних направлених коротких зв’язків. Елементами, що задовольняють ці вимоги, є берилій, бор, вуглець, азот, кисень, алюміній і кремній. Найбільш стійкі й міцні матеріали завжди містять один із цих елементів, а найчастіше складаються тільки із цих елементів.

Характеристики пластичності (δ, ψ) та міцності ($\sigma_в$, $\sigma_т$ і т. д.), що визначаються на стандартних зразках, виявляються недостатніми для прогнозування безвідмовної роботи матеріалів у реальних конструкціях. Про це свідчать випадки руйнування деталей при утворенні тріщин з напруженнями, значно нижчими за границю текучості.

Високоміцні та зносостійкі матеріали повинні мати здатність гальмувати розвиток тріщин завдяки деякій рухливості дислокацій. Здатність гальмувати розвиток тріщин визначається величиною критерію тріщиностійкості Ірвіна [8, 9]

$$K_{1c} = \alpha \sigma_{сер} \sqrt{\pi l_{кр}}\,, \tag{3.3}$$

де α – коефіцієнт, що враховує форму тріщини; $\sigma_{сер}$ – середнє рахункове напруження; $l_{кр}$ – критична довжина тріщини, здатної викликати крихке руйнування.

Значення параметра K_{1c} дає можливість визначити рівень допустимих напружень при відомій довжині тріщини й, навпаки, розмір безпечного дефекту при заданому середньому напруженні.

3.5 Зносостійкість поверхневих шарів

При аналізі зносостійкості поверхневого шару деталі, що працює у парі тертя, можна скористатися рівнянням Арчарда [30]. В області, де виконується закон Гука, воно має вигляд

$$\frac{V}{L} = K_m \frac{F_N}{\sigma_f}, \tag{3.4}$$

де V – зношений об'єм; L – шлях тертя; K_m – коефіцієнт зносу; F_N – навантаження, що діє по нормалі до поверхні; σ_f – міцність на розрив.

Відповідно до нього, існує два шляхи зниження зносу під час тертя – зменшення нормального навантаження на пару тертя або підвищення міцності поверхневого шару. На збільшення зносостійкості шарів при їх зміцненні впливають складові напруження.

Незалежні від температури складові враховують вплив (таблиця 3.6) [31]:

1) утворення дислокаційної структури

$$\sigma_1 = \alpha_1 G b \sqrt{Q_g}\ ; \tag{3.5}$$

2) зернистості границі

$$\sigma_2 = \frac{K}{\sqrt{d}}; \tag{3.6}$$

3) сторонніх атомів

$$\sigma_3 = \alpha_2 G c^n; \tag{3.7}$$

4) часток, що формують шар:

а) зв'язаних

$$\sigma_4^{(a)} = \frac{\alpha_3 \gamma_c^m R^m}{1 + 2R}; \tag{3.8}$$

б) незв'язаних

$$\sigma_4^{(b)} = \alpha_4 \left(Gb / l \right) \ln \left(R / b \right); \tag{3.9}$$

в) при безладній структурі 2-ої фази у зернах

$$\sigma_4^{(c)} = \frac{K^{/}}{\sqrt{\lambda}}; \tag{3.10}$$

г) при безладному розташуванні шарів 2-ої фази

$$\sigma_4^{(d)} = \frac{\alpha_5}{\sqrt{\lambda}};\qquad(3.11)$$

д) при грубій двохфазній структурі

$$\sigma_4^{(e)} = \left(\sigma_B - \sigma_A\right) f;\qquad(3.12)$$

де α_1, α_2, α_3, α_4 – константи, що залежать від матеріалу; K, K' – константи, що залежать від мікроструктурної будови матеріалу; G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; Q_g – щільність дислокацій; d – розмір зерна (діаметр); c – концентрація сторонніх атомів; n, m – показники степені; R – радіус часток; l – відстань між частками; γ_c – гранична енергія зсуву біля поверхні зерна; λ – середня довжина вільного шляху часток; σ_B – міцність на розрив для фази B; σ_A – міцність на розрив для фази A; f – об'ємна частка.

Таблиця 3.6 – Механізми поверхневого зміцнення

Механізм зміцнення поверхні	Схематичне зображення	Топографія поверхні
Дислокація	l	Безліч смуг ковзання або подвоєння шарів
Зерниста границя		Множинні зміщення
Сторонні атоми		Помітні смуги зміщення
Частки:		
а) зв'язані;	$2R$, l	Різкі зміщення
б) незв'язані, дисперговані;	$2R$, l, $2R$	Дрібні зміщення
в) безладне розташування 2-ої фази;	λ	
г) порушення порядку розташування шарів 2-ої фази	λ	Незв'язані зміщення
д) груба 2-фазна структура	A, B, B, A, B, A, A, B, A, B	

З урахуванням факторів, вплив яких на напруження залежить від зростання температури $T_0 > T$ (тобто швидкості пластичної деформації та механізму зміцнення), можна записати

$$\sigma_f = \alpha_1 Gb\sqrt{Q_g} + \frac{K}{\sqrt{d}} + \alpha_2 Gc^n + \frac{\alpha_3 \gamma_c^m R^m}{1+2R} + \alpha_4 \frac{Gb}{l}\ln\frac{R}{b} +$$

$$+\frac{K^{/}}{\sqrt{\lambda}} + \frac{\alpha_5}{\lambda} + \left(\sigma_B - \sigma_A\right) f + \sigma_0\left[1-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{n^{/}}\right]^{m^{/}}, \quad ; \qquad (3.13)$$

де n' і m' – емпіричні показники степеня; σ_0 – міцність на розрив при T_0.

З фізичної точки зору рівняння характеризує види зміцнення поверхневого шару. Для того, щоб відбувався адгезійний процес під час тертя, градієнт опору зсуву τ у шарі на глибині z повинен бути додатним [32]

$$\frac{d\tau}{dz} > 0. \qquad (3.14)$$

Таким чином, щоб забезпечити нормальну роботу пари тертя при одночасному збільшенні строку служби спряження, необхідно використовувати поверхневе зміцнення шляхом нанесення багатошарових, комбінованих покриттів із застосуванням різних механізмів зміцнення по товщині шару.

3.6 Підвищення зносостійкості та зміцнення матеріалів

За характеристиками міцності й надійності всі сталі та сплави можуть бути розділені на групи (рисунок 3.1) [33].

Широко застосовувані у промисловості евтектоїдні сталі (ПП), низьковуглецеві (НЛС) і середньовуглецеві низьколеговані (КЛС) сталі зміцнюються загартуванням та відпусканням, характеризуються низькою конструкційною міцністю: вони або не забезпечують високий рівень статичної міцності (σ_m), або не забезпечують надійність. Тільки використання мартенситностаріючих сталей (МСС), термомеханічної обробки (ТМО) чи застосування принципово нових сталей (СМЗ, МАС) забезпечують високу конструкційну міцність.

Зносостійкі, високоміцні сталі й сплави особливо чутливі до чистоти металу за неметалічними включеннями та газоподібними домішками. Чистіші сплави забезпечують високі значення критерію тріщиностійкості, низьку температуру переходу в крихкий стан, тобто високу конструкційну міцність. Тому їх слід виплавляти як високоякісні й потім піддавати переплавам.

Отримання зносостійкого, високоміцного стану без зміцнюючої термічної обробки в наш час неможливе. Застосовують два різновиди зміцнюючої обробки: загартування на мартенсит з наступним низьким відпусканням та

загартування на перенасичений твердий розчин з наступним зміцнюючим відпусканням (старінням) [9].

Для одержання високої міцності та зносостійкості матеріали піддають термомеханічній обробці, яка дозволяє поєднати зміцнення від пластичної деформації й зміцнення від мартенситного перетворення або дисперсійного зміцнення. При термомеханічній обробці сталей мартенсит успадковує дислокаційну структуру деформованого аустеніту, що приводить до підвищення міцності та запасу пластичності [15].

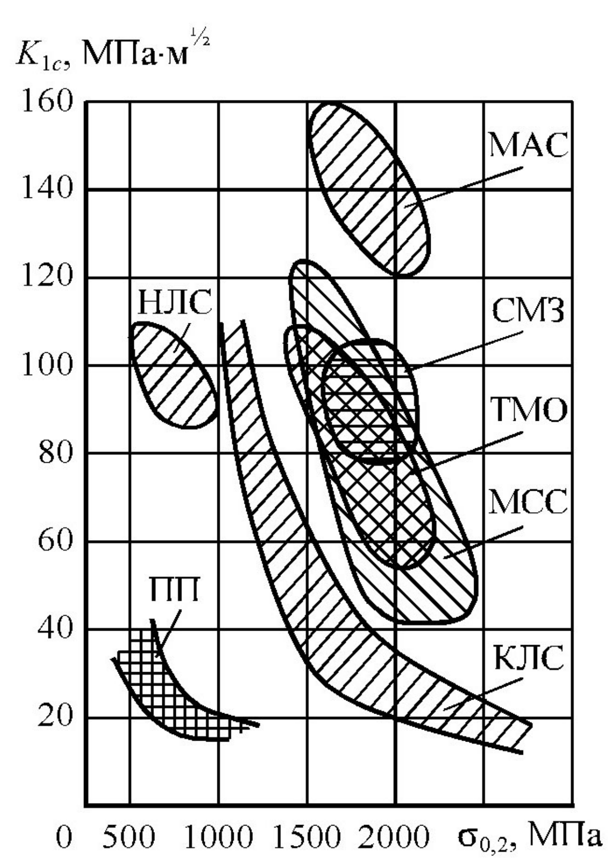


Рисунок 3.1 – Узагальнена діаграма конструктивної міцності сталей (О.Н. Романів, А.Н. Ткач):

МАС – нестабільні аустенітні сталі; СМЗ – сталі із наддрібним зерном; ТМО – сталі після термомеханічної обробки; МСС – мартенситностаріючі сталі; КЛС – середньо- та високовугле-цеві конструкційні сталі; НЛС – низьколеговані низьковуглецеві сталі (< 0,2 °С); ПП – евтектоїдні сталі зі структурою пластинчастого перліту

Характерна риса практично всіх високоміцних сталей і сплавів – підвищена чутливість до концентраторів напружень. Друга особливість – залежність границі витривалості σ_R від границі міцності $\sigma_в$. Якщо для сталей нормальної міцності збільшення границі міцності $\sigma_в$ спричиняє зростання границі витривалості σ_R, причому $\sigma_R/\sigma_в \approx 0{,}5$, то для високоміцних сталей, навпаки, веде до зниження границі витривалості σ_m [33].

Працездатність конструкції визначається ***експлуатаційними*** або ***службовими*** характеристиками матеріалів, що застосовуються для її

виготовлення. Залежно від умов експлуатації й робочого середовища, крім високої міцності, до машинобудівних матеріалів можуть ставитися вимоги за:

1) жароміцністю, тобто збереження високих механічних характеристик при високих температурах;

2) корозійною стійкістю при роботі в різних агресивних середовищах;

3) зносостійкістю при експлуатації з інтенсивним стиранням та ін.

Отже, при виборі матеріалу для створення технологічної конструкції необхідно комплексно враховувати як експлуатаційно-технологічні, так і фізико-механічні характеристики.

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ МАШИНОБУДІВНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Забезпечення якості сталі та чавуну

Якість сталі та чавуну визначається технологією виплавки, додатковою позапічною обробкою рідкої сталі й переплавом злитків.

Основна маса вуглецевої сталі виплавляється у мартенівських печах, кисневих конверторах, а також дугових електропечах [24].

Якість сталі визначається вмістом шкідливих домішок, однорідністю хімічного складу й структури. Шкідливими домішками є насамперед сірка (S), фосфор (P), миш'як (As), кисень (O), азот (N) та водень (H). O і S практично нерозчинні в залізі (Fe) й тому присутні в сталі у формі неметалевих включень – оксидів, сульфідів та оксисульфідів. P і As перебувають у твердому розчині, суттєво зменшують пластичність і сприяють крихкому руйнуванню (особливо при низьких температурах). H перебуває у твердому розчині, N частково перебуває в розчині, а частково зв'язаний у нітриди.

Неметалеві включення – оксиди, сульфіди й нітриди – являють собою тверді частки з розмірами від одного до десятків мікрометрів. Великі частки з розміром від 20 мкм і вище знижують міцність та контактну витривалість. Ці включення виявляються небезпечними концентраторами напружень і зменшують опір втомі.

Шкідлива дія розчиненого H проявляється у зниженні пластичності й схильності до крихкого руйнування під дією напружень [34]. Дія розчиненого N проявляється у підвищенні текучості та тимчасового опору при одночасному зниженні пластичності внаслідок старіння. В усіх випадках природа старіння одна: атоми N закріплюють наявні дислокації, що знижує пластичність [9].

Якість сталі залежить також від характеру розкислення при виплавленні [35]. Розкислення – це процес видалення кисню з рідкої сталі, необхідний для забезпечення міцності та запобігання крихкому руйнуванню при гарячому деформуванні. Розрізняють спокійні, напівспокійні й киплячі сталі. Спокійні сталі розкисляють марганцем (Mn), кремнієм (Si), алюмінієм (Al), і вміст кисню у них знижується до 0,006…0,002%, вони кристалізуються спокійно без виділення газів. Киплячі сталі розкислюють Mn до вмісту кисню 0,04…0,02%, при цьому кисень, частково взаємодіючи із вуглецем, виділяється у вигляді CO. Напівспокійна сталь має підвищений вихід придатного, у порівнянні зі спокійною, і менш виражені схильність до старіння та ліквацій, нестабільність властивостей у порівнянні з киплячою сталлю.

Для підвищення якості стали використовують позапічну обробку рідкого металу, мікролегування й переплав злитків [34, 36].

Позапічна обробка включає у себе такі процеси: вакуумування, обробку синтетичним шлаком (рідкий шлак з високим умістом CaO, Al2O3 і добавкою CaF2), продування інертним газом (аргоном), обробку активними елементами (кальцієм і рідкісноземельними металами) [36, 37].

Мікролегування – це додавання у сталь активних легуючих елементів (ніобію (Nb), ванадію (V), титану (Ti), молібдену (Mo)) для підвищення міцності у кількостях близько 0,1 % [34, 36]. Утворюючи дисперсні міцні карбонітриди, ці елементи дають можливість одержати дрібнозернисту структуру й зменшити кількість неметалевих включень.

Переплав злитків забезпечує потреби машинобудування в особливо чистому металі, що відрізняється однорідністю механічних властивостей [36, 37]. Переплавлені злитки виділяються щільною макроструктурою й очищені від більшої частини неметалевих включень.

Новими напрямами підвищення якості сталевих виробів є порошкова металургія, виробництво сталі з металізованих котунів (губчастого заліза) і створення злитків з армованої квазімонолітної сталі [38].

Чавун є основним матеріалом литих деталей машин. На частку чавунних виливків припадає близько 75% лиття у машинобудуванні [39]. Якість виливків чавуну забезпечується вибором шихти, оптимізацією плавки й комплексом заходів для одержання необхідної структури. Найдійовішим способом підвищення властивостей чавунних виливків є модифікування, що змінює форму й розміри часток графіту, а також структуру основи [9, 39].

Знижена міцність і практично повна відсутність пластичності, зумовлена ***пластинчастою формою графіту***, – головний недолік сірого чавуну. Структура й властивості його визначаються хімічним складом і швидкістю охолодження при затвердінні. За міцністю та пластичністю, а також зносостійкістю ***високоміцний чавун з кулястим графітом*** перевершує сірий. ***Вермикулярний графіт*** являє собою короткі стовщені пластини із закругленими краями. Чавун з вермикулярним графітом за ливарними властивостями близький до сірого, а за міцністю й пластичністю наближається до високоміцного. Завдяки високій теплопровідності цього чавуну забезпечується термостійкість виробів. Модифіковані чавуни обмежують застосування ***ковкого чавуну із пластівчастим графітом***, який використовують у виробництві виливків, коли практично неможливо запобігти відбілу.

Резервом підвищення міцності чавунних виливків є термічна обробка [9]. Завдяки збільшенню частки перліту в основі або одержанню бейнітної структури підвищуються міцність і твердість, але зменшується пластичність. Термічне зміцнення застосовують в основному для виливків з легованих чавунів.

4.2 Сплави з високими пружними та пластичними показниками

Основні показники, які повинні мати пружинні сплави, – це висока границя пружності, висока релаксаційна стійкість та низькі значення характеристик непружності. Для досягнення високого опору малим пластичним деформаціям і забезпечення високої границі текучості необхідно створювати перешкоди для переміщення практично всіх наявних у сплавах дислокацій [9].

Зміцнююча обробка пружинних сплавів, як правило, комплексна, що поєднує кілька механізмів зміцнення. Наприклад, у сплавах на основі заліза найбільш високі характеристики досягаються поєднанням загартування, пластичної деформації й відпускання.

Для опису ефектів відновлення форми зразка, зміненої у результаті пластичної деформації з наступним нагріванням або охолодженням, використовують термін ***«пам'ять форми»*** [40, 41]. В основі цих ефектів лежить так зване термопружне мартенситне перетворення.

Сплави першої групи, наділені ефектом пам'яті форми, здатні до однократного відновлення форми при нагріванні або охолодженні. Існує й інша група сплавів, що мають ***«оборотну пам'ять форми»***. Ефект оборотної пам'яті форми полягає в прямій залежності форми зразка від температури. Кожній температурі відповідає своя форма й цей ефект проявляється при багаторазовій зміні температури [40].

Сплави з ефектом пам'яті форми володіють ***надпружністю***. Проявляється вона у тому, що деталь зазнає оборотні деформації, які на один-два порядки більші, ніж деформація металевих матеріалів до умовної границі пружності [9].

Здатність металів і сплавів до рівномірної пластичної деформації, що досягає сотень та тисяч відсотків без яскраво вираженої зони її локалізації, називають ***«надпластичністю»***. Напруження, що викликають пластичну деформацію при надпластичності, становлять 1…10 МПа [42, 43].

Існує два принципово різні типи надпластичності. В одному випадку це явище спостерігається при деформуванні металів і сплавів, що зазнають фазові перетворення, поблизу температур перетворень при термоциклюванні або в ізотермічних умовах. В іншому— при деформуванні двох- і багатофазних сплавів або неполіморфних металів у діапазоні температур 0,5…0,8 від температури плавлення ($T_{пл}$) за відсутності фазових переходів [43, 44].

Надпластичний стан, викликаний фазовими перетвореннями, проявляється при різному вихідному структурному стані. Так, термоциклювання сталей з різним вмістом вуглецю (0,2…1 %) в інтервалі температур 540…850°С забезпечує деформацію до руйнування δ = 500…700% [44].

Найбільш відома так звана мікрозеренна надпластичність, що проявляється за відсутності фазових перетворень. Вона виявляється в матеріалах з дуже дрібними рівновісними кристалами (0,5…10 мкм) при високих температурах (не менше ніж 0,5 $T_{пл}$) і при малих швидкостях деформації [42, 43].

4.3 Матеріали малої густини й високої питомої міцності

Алюмінієві сплави – конструкційні матеріали, що широко використовують у різних галузях промисловості завдяки вигідному поєднанню механічних і фізичних властивостей, корозійній стійкості, високій технологічності й великим сировинним ресурсам [9]. Розроблено велику кількість алюмінієвих сплавів з різним рівнем міцності ($\sigma_в$ = 130…680 МПа), підвищеної пластичності (δ до 20…25%), жароміцності, корозійної стійкості й ін. [45, 46].

Зміна технологічних і експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів відповідно до діаграми станів (рисунок 4.1 і 4.2) показує, що сплави із умістом легуючого компонента (*B*), менші від межі розчинності при високій температурі, мають найбільшу пластичність та найменшу міцність, отже, й добре піддаються гарячій обробці тиском.

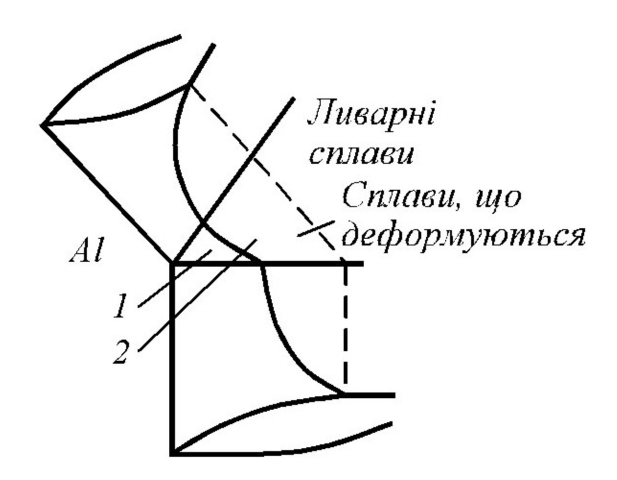


Рисунок 4.1 – Класифікація алюмінієвих сплавів за діаграмою станів:
1 – незміцнювані термічною обробкою; 2 – зміцнювані термічною обробкою

Наявність евтектичної структури різко зменшує пластичність, здатність пресуватися, прокочуватися, куватися (і при невеликому вмісті евтектики така обробка стає нездійсненною). Найкращу рідкотекучість мають метали, що кристалізуються при постійній температурі (чисті метали, евтектичні сплави).

У результаті алюмінієві сплави на основі діаграми станів можна класифікувати на ***ливарні*** й ***деформівні***. Ливарні сплави не повинні містити багато евтектики (понад 15…20% за об'ємом) через погіршення механічних і технологічних властивостей. Ливарні сплави можуть зміцнюватися термічною обробкою, але ступінь зміцнення тим менший, чим більше ливарний сплав легований (тобто чим більше в структурі евтектики) [47].

Деформівні сплави підрозділяють на такі, що ***зміцнюються та не зміцнюються термічною обробкою***. Теоретично границею між цими сплавами повинна бути границя насичення твердого розчину при постійній температурі (див. рисунок 4.2), але практично вміст легуючих елементів повинен бути більшим.

Таким чином, поліпшення експлуатаційних характеристик алюмінієвих сплавів досягається підвищенням їх металургійної якості (насамперед зниженням вмісту шкідливих домішок), удосконаленням технологій одержання напівфабрикатів і заготовок, а також раціональним легуванням і розробленням оптимальних режимів зміцнюючої обробки.

Магнієві сплави – це сучасні конструкційні матеріали, що мають низку специфічних механічних і фізико-хімічних властивостей [9]. Вони володіють малою густиною і тому мають досить високу питому міцність, характеризуються високими демпферуючими властивостями. Їх опір утомі у 100 разів більший, ніж у дюралюмінію, вони можуть тривалий час працювати

при температурі 350°C і короткочасно при 400°C. Сплави Mg мають добрі технологічні властивості: легко обробляються різанням, добре деформуються й зварюються. Основний недолік сплавів Mg – низька корозійна стійкість.

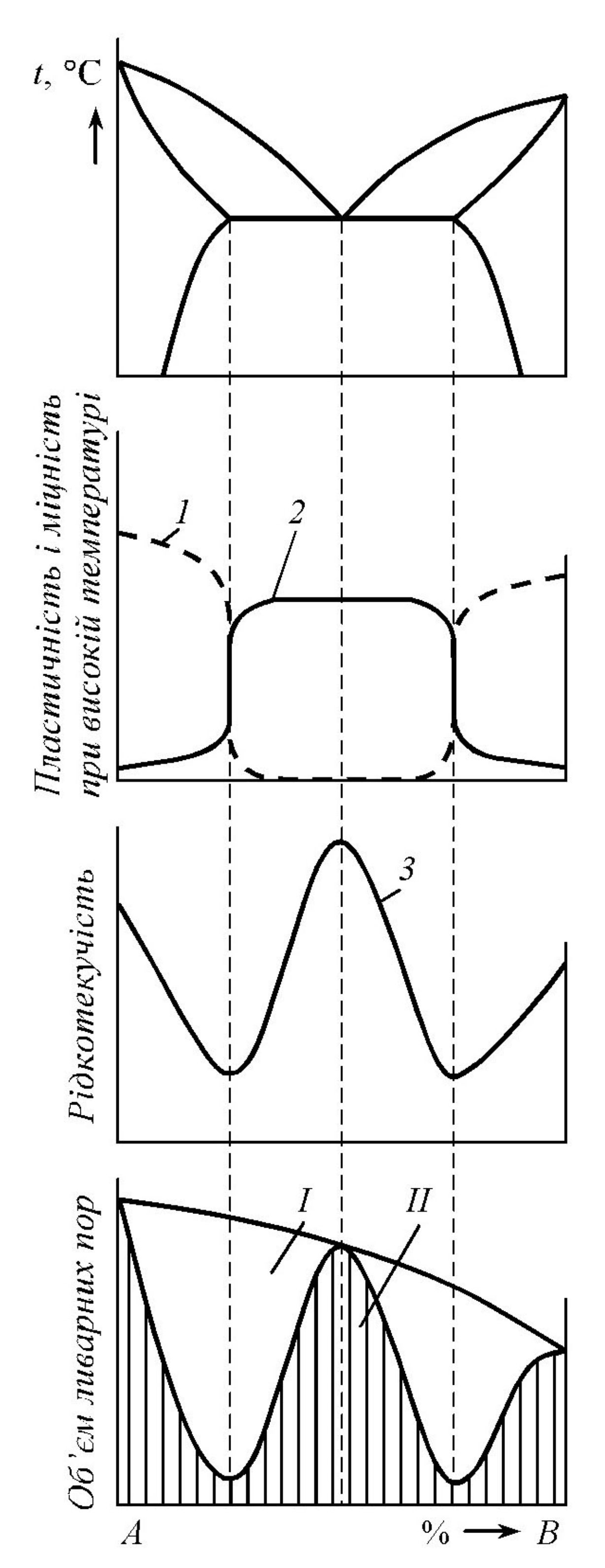


Рисунок 4.2 – Технологічні та експлуатаційні властивості двокомпонентних сплавів з обмеженою розчинністю:
1 – пластичність; 2 – міцність; 3 – рідкотекучість;
I – розсіяні пори; II –сконцентровані пори

Найпоширеніші магнієві сплави гарантують границю міцності 240…420 МПа для тих, що деформуються, і 150…340 МПа для ливарних сплавів [48, 49].

Шляхи подальшого поліпшення механічних властивостей магнієвих сплавів – удосконалення технології лиття, обробки тиском, термічної обробки, а також легування спільно декількома рідкісноземельними металами. Великий інтерес становлять сплави магнію з літієм – найлегшим металом.

Титанові сплави – перспективні конструкційні матеріали, що наділені комплексом цінних властивостей: великою питомою міцністю, високою корозійною стійкістю в атмосферних умовах і ряді хімічно активних середовищ, а також високою температурою плавлення, немагнітністю, малим коефіцієнтом термічного розширення, біологічною інертністю й ін.

До недоліків титану і його сплавів належать: активна взаємодія з газами при підвищених температурах, низькі антифрикційні властивості й погана оброблюваність різанням [50].

Титан має дві поліморфні модифікації: низькотемпературну – α із ГЩУ ґраткою до 882°С і високотемпературну – β з ОЦК ґраткою до 1665°С. Тому всі титанові сплави умовно підрозділяють на α-сплави, β-сплави й (α + β)-сплави. За технологією виготовлення сплави Ті ділять на ***деформівні*** й ***ливарні***, а за здатністю зміцнюватися при термічній обробці – на ***зміцнювані*** та ***незміцнювані*** [51].

α-сплави відносять до термічно незміцнюваних, вони можуть бути як деформівними, так і ливарними. Ці сплави високопластичні й добре обробляються тиском. β-сплави відносять до таких, що деформуються, термічно зміцнювані сплави, їх термообробка складається із загартування з наступним старінням. (α + β)-сплави можуть бути деформівними і ливарними, та ті й інші зміцнюються термічною обробкою, яка складається із загартування і старіння. У промислових сплавах цього типу переважає α-фаза, а ефект зміцнення пропорційний кількості β-фази [9, 51].

Усі сплави на основі титану мають у своєму складі алюміній. Це зумовлено тим, що введення алюмінію:

− знижує густину і підвищує питому міцність сплавів;

− ефективно зміцнює α-, β- і (α + β)-сплави, зберігаючи задовільну пластичність;

− підвищує жароміцність і опір повзучості;

− підвищує модуль пружності;

− зменшує схильність до водневої крихкості [9].

Властивості титану і його сплавів можна змінити в досить широких межах термічною й хіміко-термічною обробкою.

Берилієві сплави – нові конструкційні матеріали, що використовують у найважливіших галузях техніки, споживання яких безупинно зростає. Вони перевершують за питомою міцністю всі інші легкі метали, мають високі теплові властивості, добре протистоять зношуванню і повзучості, є жаростійкими та корозійностійкими матеріалами, мають розмірну стабільність [52]. Берилій – перспективний матеріал авіаційної й ракетно-космічної техніки. Він є

найважливішим матеріалом атомної техніки, оскільки має мінімальний поперечний переріз захвату теплових нейтронів і максимальний перетин розсіювання нейтронів. При кріогенних температурах електропровідність берилію в 5–6 разів перевищує показники кращих провідникових матеріалів [53].

Основними недоліками, що обмежують використання берилію як матеріалу з гарантованими механічними властивостями, є невисока пластичність, низька ударна в'язкість та анізотропія властивостей після обробки тиском, погана зварюваність і токсичність при одержанні й механічній обробці. Механічні властивості берилію та його сплавів залежать від їх чистоти й величини зерна.

Існують дві технології переробки берилію у напівфабрикати – ливарна і порошкова, причому остання є основним промисловим способом [9].

4.4 Жароміцні матеріали та жаростійкі покриття

Жароміцними називають матеріали, які здатні тривалий час витримувати навантаження при підвищених температурах. Як правило, жароміцність матеріалів ураховується тоді, коли температура експлуатації перевищує (0,4…0,5)$T_{пл}$. При нагріванні послаблюються міжатомні зв'язки й тому зменшується твердість, границя текучості, модуль пружності [9].

Характерною особливістю високотемпературної експлуатації деталей є ***повзучість***. Вона пояснюється прискоренням дифузійних процесів при нагріванні. Іншими джерелами поступового нагромадження пластичної деформації є проковзування зерен одного відносно іншого й дифузійні процеси вздовж границь зерен. При постійному напруженні й незмінній температурі залежність повзучості від часу однотипна для різних матеріалів (рисунок 4.3).

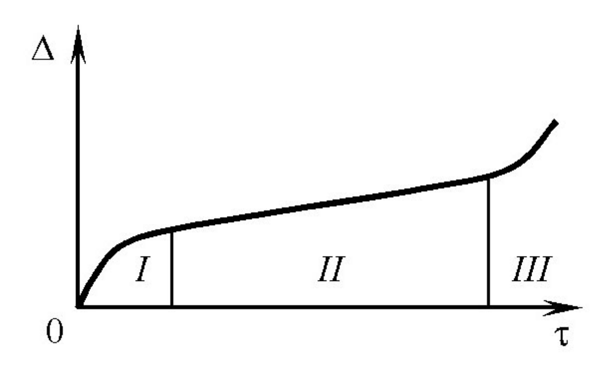


Рисунок 4.3 – Крива повзучості:
Δ – деформація; *τ* – час; *I* – повзучість, що не встановилася (швидкість деформації зменшується); *II* – повзучість, що встановилася (швидкість деформації постійна); *III* – швидке руйнування (зростаюча швидкість деформації)

Жароміцність забезпечується легуванням і термічною обробкою. Для забезпечення найвищої жароміцності деталі піддають термічній обробці з

метою одержання крупного зерна й однорідного розподілу дрібних часток других фаз усередині зерен і на границях між ними. Укрупнення зерна зменшує шкідливий вплив границь, а дрібні частки других фаз утруднюють переміщення дислокацій, що в цілому зменшує повзучість [9].

Найпоширенішими матеріалами є жароміцні сталі, що застосовують до 700°C. Для інтервалу температур 700…1050°C використовують тугоплавкі сплави й жароміцну кераміку. При більш високих температурах придатним є вольфрам і його сплави, а також графіт [54, 55].

Особливе місце займають ***легкі жароміцні сплави***. Жароміцні сплави алюмінію застосовують до температур 300…350°C, а порошкові матеріали навіть до 500…550°C. Жароміцні сплави магнію придатні до температур 300…350 °C. Сплави титану використовують при температурах не вище 500°C [9].

Групою жароміцних сталей, що найширше застосовують, є ***перлітні сталі***. Їхня термічна обробка полягає в нормалізації після нагрівання до 950…980°C і наступного відпускання при температурі 700…750°C для стабілізації структури. Вироби з ***мартенситних сталей*** використовують у термічно обробленому стані після загартування й відпускання при температурі 650°C, при цьому утворюється двофазна структура легованого фериту з дисперсними частками карбідів. ***Аустенітні корозійностійкі*** сталі використовують як жароміцні при температурах до 700°C [55].

Жароміцні сплави на основі нікелю (Ni) представляють унікальну за властивостями групу матеріалів, що поєднують жароміцність, хімічну стійкість, міцність при статичних і змінних навантаженнях [25]. Оптимальних властивостей вони набувають після загартування на повітрі з температур 1200…1250°C і наступного старіння при температурах 750…850 °C протягом тривалого строку до 20…30 годин.

Після старіння їх структура становить суміш твердого розчину із ГЦК ґраткою й часток метастабільної γ'-фази-Ni (Al, Ti), також із ГЦК ґраткою.

Для використання при високих температурах потрібна так звана ***тонка*** або ***особливо чиста кераміка***, що відрізняється від звичайної підвищеною міцністю й меншою крихкістю.

Матеріалами високотемпературної кераміки служать SiC, Si_3N_4, а також Al_2O_3 з розмірами часток вихідних речовин менше ніж 1 мкм. Вироби доводиться пресувати й спікати при температурах 1500…2000°C. При тисках порядку десятків МПа забезпечується щільність до 99% [56].

Будь-які матеріали, що застосовують при високих температурах, уступають у хімічну взаємодію з навколишнім газовим середовищем і зазнають газової корозії. Швидкість корозії сильно зменшується, якщо матеріал й активне газове середовище виявляються розділеними плівкою продуктів корозії, котра виконує роль захисного бар'єра.

Жаростійкістю називають здатність матеріалу опиратися окисненню в газовому середовищі при високих температурах.

Для захисту від газової корозії використовують три методи:

1) ізоляцію металу від агресивного середовища;

2) застосування захисних покриттів;

3) легування [9].

Найбільше застосування у розробленні жаростійких матеріалів дістало легування. Для сталей і сплавів на основі Fe або Ni використовують хром (Cr). Дія Cr полягає в утворенні складного оксиду типу $(Fe, Cr)_2O_3$ на поверхні сталі. Такі сталі успішно експлуатуються при температурах 850…1100 °С.

Для захисту жароміцних нікелевих сплавів на основі тугоплавких металів (Mo, W, Nb, Ta) застосовують жаростійкі покриття.

Найчастіше використовують алюмінідні покриття, основою яких є суміш фаз NiAl і Ni3Al. Коли їх жаростійкість виявляється недостатньою, застосовують багатокомпонентні покриття, що містять Al, Cr і Si. Перебуваючи в покритті, Cr перешкоджає дифузії Al. Після алюмохромування й алюмосиліціювання на сплавах Ni отримують пластичні й довговічні покриття [57].

Для захисту тугоплавких матеріалів від окиснення також застосовують хромоалюмосиліціювання, що дозволяє експлуатувати такі вироби при температурах, які досягають 1500…1600°С.

4.5 Корозійностійкі матеріали і покриття

Конструкційні матеріали, що працюють у хімічно активному середовищі, крім визначеного комплексу технологічних та експлуатаційних властивостей повинні ще й не піддаватися корозійному руйнуванню – мати корозійну стійкість.

Корозійна стійкість залежить від великої кількості факторів: хімічного складу і структури металу, наявності на поверхні захисних оксидів, від складу, температури середовища й ін. Залежно від дії факторів змінюється не тільки швидкість корозії, але механізм та характер корозійного руйнування.

Корозійну стійкість оцінюють за десятибальною шкалою залежно від значення швидкості корозії (бали 1…5 призначають корозійностійким матеріалам, бали 6…10 – некорозійностійким) [58, 59].

Серед чистих металів високою корозійною стійкістю в атмосферних умовах і воді вирізняється Cu, що зумовлюється позитивним значенням її електродного потенціалу. Корозійна стійкість Zn, Fe, Sn, Pb, які мають від’ємне значення електродного потенціалу, залежить від середовища. У вологій атмосфері й воді є корозійностійкими Zn, Sn, Pb, що викликається добрими захисними властивостями продуктів корозії, які гальмують катодний процес. Метали Mg, Ti, Al, Cr називають такими, що пасивують. У певних умовах корозії на їх поверхні утворюються захисні плівки, які гальмують анодний процес. Метали Ti, Al, Cr переходять у пасивний стан мимовільно в кисневмісних середовищах. Недолік кисню й наявність іонів усувають пасивність Al, Cr, Mg у морській воді. Титан є корозійностійким у всіх середовищах. У вологій атмосфері й воді Mg пасивує слабко, однак він має

високу стійкість у лужних середовищах та середовищах, що містять рідкі вуглеводні, аміак і фтор.

Легуючі елементи в конструкційних сталях і сплавах, забезпечуючи необхідний комплекс фізико-механічних та технологічних властивостей, змінюють корозійну стійкість основного металу. Характер цієї зміни визначається складом сплаву і його структурою, що формується при термічній обробці [60].

Легуючі елементи утворюють із основним металом тверді розчини, а також самостійні проміжні фази. Тверді розчини зберігають електрохімічні властивості основного металу до певного вмісту легуючого елемента, при більшому його вмісті твердий розчин набуває властивостей легуючого елемента. Корозійна стійкість багатофазних сплавів визначається електрохімічними властивостями основної переважної фази твердого розчину та включень проміжної фази.

При виборі матеріалів, корозійностійких для заданих умов експлуатації необхідно приділяти увагу здатності матеріалу до місцевих корозійних руйнувань. Такий вид руйнування спричинений неоднорідностями хімічного складу матеріалу, навколишнього середовища або напруженнями розтягу, які створюють на поверхні металу локальні активні ділянки [60, 61].

Широко застосовують у машинобудуванні ***корозійностійкі сталі***, що мають добру міцність і технологічність. Корозійна стійкість досягається легуванням хромом (понад 12,5 %). Додаткове легування нікелем та марганцем дає можливість одержувати однофазну аустенітну або аустенітно-феритну структуру [62].

Створення сплавів зі зниженим умістом домішок є сучасним напрямом одержання матеріалів високої корозійної стійкості. Найбільш перспективними в цей час є ***аморфні сплави***. Повна відсутність порядку в розташуванні атомів, відсутність границь зерен і дефектів робить їх більш однорідними матеріалами, ніж полікристалічні сплави. Тому в аморфних хромонікелевих сплавах відсутні катодні ділянки й корозія не розвивається [9].

Поширеним засобом підвищення корозійної стійкості та довговічності деталей машин є застосування ***корозійностійких покриттів***. За характером основи покриття розділяють на металеві й неметалеві.

Металеві покриття з більш електропозитивного металу, ніж метал, який захищається, забезпечують корозійну стійкість, за умов відсутності механічних пошкоджень. Для сталі в цій якості використовують покриття оловом або свинцем. Катодними покриттями є також покриття пасивуючими металами й сплавами. Їх отримують при хромуванні та нікелюванні сталі [61].

Неметалеві покриття однотипні за механізмом свого впливу. Володіючи більшим електричним опором, вони зменшують корозійний струм і швидкість корозії.

Покриття дуже різноманітні за своїм складом та способами нанесення. З найбільш уживаних розрізняють:

− оксидні покриття на сталях, алюмінієвих і магнієвих сплавах, які формують хімічними, термічними або електрохімічними методами;

− покриття на основі Si і Cr, які створюють випаровуванням рідких елементоорганічних з’єднань у тліючому розряді;

− лакофарбові покриття, які одержують зануренням, поливанням або розпиленням рідкого розчину;

− полімерні покриття на основі поліетилену, полівінілхлориду, поліаміду, які кріплять на поверхню за допомогою клею або шляхом підігрівання й обтиснення.

4.6 Зносостійкі матеріали і покриття

Зносостійкість залежить від комбінації матеріалів у парі тертя, від виду тертя й режиму роботи (швидкість відносного ковзання, навантаження, характер її прикладання), від властивостей мастильного матеріалу, температури середовища [32, 63].

Сукупність цих факторів визначає різні види зношування [64, 65]:

− механохімічне нормальне;

− механохімічне абразивне;

− атермічне схоплювання;

− термічне схоплювання;

− фретинг-процес (схоплювання й динамічне окислення);

− механічне абразивне;

− пітинг-процес (утома при коченні);

− пошкодження інших видів (кавітація, корозія, ерозія, зминання й ін.).

Недопустимі види руйнування (пошкодження) при терті ділять на:

− абразивне зношування;

− утомне зношування;

− руйнування в умовах великих тисків і ударних навантажень [64, 65].

При ***абразивному зношуванні*** основними є процеси багаторазового деформування поверхні й мікрорізання частками, що ковзають по ній. Тому найбільшу зносостійкість будуть мати матеріали з високою твердістю поверхні, структура яких складається з високоміцної матриці та твердої карбідної фази [25, 47].

Карбідні сплави застосовують при найбільш важких умовах роботи у вигляді литих і наплавних матеріалів. Як правило, це сплави на основі заліза з високим умістом вуглецю (до 4%) і великою кількістю карбідоутворюючих елементів: Cr, W, Ti (вміст яких досягає 50%). Структура матричної фази залежно від умісту марганцю або нікелю може бути мартенситною або аустенітною.

Порошкові тверді сплави використовують як інструментальні матеріали, так і для деталей, що працюють у середніх умовах зношування. До них відносять тверді сплави, що складаються зі спеціальних карбідів (WC, TiC, TaC), зв’язаних кобальтом, а також високовуглецеві сталі з мартенситною матрицею та дрібнодисперсними карбідами.

Низько- і ***середньовуглецеві сталі***, а також ***чавун*** застосовують для більш легких умов зношування в умовах граничного змащення.

Циклічні контактні напруження стискання, а також циклічні напруження при згині викликають ***втомне викришування***, або ***утворення втомних тріщин***. Для роботи при низьких динамічних навантаженнях і великих контактних напруженнях застосовують хромисті ***шарикопідшипникові сталі***. Типовою термічною обробкою цих сталей є неповне загартування при 820…850°С і низьке відпускання при 150…170°С з наступною обробкою холодом при – 70…–80°С.

Для забезпечення високого опору втомі й стійкості до абразивного й окисного зносів використовують сталі, що мають твердий поверхневий шар у поєднанні з в'язкою, але досить міцною серцевиною. Таку комбінацію властивостей можна одержати при термічній або хіміко-термічній обробці ***низько-*** і ***середньовуглецевих*** сталей.

Деталі, що працюють в умовах тертя при ***високому тиску*** й ***ударному навантаженні***, виготовляють із високомарганцевистих аустенітних сталей (типу 110Г13Л: 1,1% С і 13% Mn). Висока зносостійкість цих сталей пояснюється здатністю аустеніту до сильного деформаційного зміцнення.

Як ***кавітаційно стійкі*** конструкційні матеріали поза конкуренцією перебувають ***сталі з метастабільною структурою аустеніту***. У цих сталях, крім наклепу при ударах, відбувається часткове мартенситне перетворення, що споживає енергію удару й додатково зміцнює поверхню деталі.

Нанесення ***зносостійких покриттів*** – сучасний ресурсозберігаючий технологічний напрям підвищення надійності й довговічності деталей машин [66, 67]. Зносостійкі покриття за своїм складом можуть бути розділені на [67, 68]:

− залізо, нікель, хром, титан і сплави на їх основі;

− сплави, що самофлюсуються, систем Ni-Cr-B-Si-C та Fe-Cr-B-Si-C;

− мідь, свинець, олово, бронза, бабіти;

− алюміній, цинк і сплави на їх основі;

− оксиди Al_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, SiO_2, CaO, YO, MgO, Fe_2O_2;

− карбіди вольфраму в суміші з кобальтом, сплавами, що самофлюсуються, інтерметалідами Al, Ti, Ni;

− карбіди хрому й титану в суміші із сплавами, що самофлюсуються, інтерметалідами Al, Ti, Ni і нікельхромистими сплавами;

− тугоплавкі метали W, Mo, Nb, Ta в чистому вигляді й у суміші зі сплавами, що самофлюсуються;

− кермети.

Зміцнюючі покриття, крім поділу за хімічним складом, ***класифікують за методами нанесення*** [14, 67], а саме:

− дифузія;

− наплавлення;

− напилювання;

− оплавлення;

− осадження з газової (парогазової) фази;

− осадження з розчинів;

− осадження електрохімічне;

− плакування;
− занурення в розплав;
− припікання;
− комбіновані методи.

Технологія зміцнення деталей зносостійкими покриттями взаємопов’язана з хімічним складом покриття, що наноситься, відповідно до якого порошкові матеріали ділять на:

− гранульовані, призначені для порошкового наплавлення;
− гранульовані й високолеговані порошкові суміші, призначені для газотермічного напилювання з наступним оплавленням;
− гранульовані й композиційні термореагуючі, призначені для газопорошкового напилювання без наступного оплавлення.

Найбільш широкого застосування для відновлення зношених деталей набули сталеві та хромонікелеві порошки і наплавні дроти.

4.7 Композиційні матеріали

Композиційні матеріали – новий клас конструкційних матеріалів, при створенні яких використовують принцип комбінації різнорідних матеріалів зі збереженням границі розподілу між ними для одержання якісно нових властивостей, не притаманних вихідним компонентам [9].

Композиційні матеріали мають такий комплекс властивостей, який недосяжний у традиційних металевих та полімерних матеріалах. Вони значно перевершують їх за питомою міцністю, опором утомі, жароміцністю й іншими фізичними і спеціальними властивостями.

У більшості випадків процес виготовлення композиційного матеріалу поєднують із процесом виготовлення напівфабрикату або деталі, реалізуючи при цьому заздалегідь задані властивості.

Основними групами композиційних матеріалів є: ***волокнисті*** та ***дисперсійно-зміцнені***. Вони складаються з металевих, полімерних або керамічних матриць, зміцнених або армованих безперервними чи дискретними волокнами, дротом, ниткоподібними кристалами або дисперсними частками. До них відносять також шаруваті композиційні матеріали, направлені евтектики й псевдосплави [69, 70].

Створення і використання волокнистих композиційних матеріалів дозволяє розв’язувати одну з найважливіших задач сучасної техніки: підвищення вагової ефективності матеріалу в результаті зниження маси конструкції при одночасному підвищенні її міцності.

Для армування металевих і полімерних матриць широко використовують ***борні волокна***, що характеризуються високою міцністю, твердістю й малою густиною. Такі волокна одержують висаджуванням бору на вольфрамовому або вуглецевому керні.

Більшою різноманітністю наділені ***вуглецеві волокна***, що одержують в основному розкладанням віскозного і поліакрилонітрильного волокна.

Вуглецеві волокна застосовують для зміцнення металевих і неметалевих матриць.

Найбільш дешевим та технологічним зміцнювачем металевих матриць є ***дроти з корозійностійких сталей***, однак вони мають порівняно більшу густину.

Малу густину має ***берилієвий дріт***, міцність якого значною мірою залежить від діаметра.

Металеві волокна й дріт мають задовільну пластичність і можуть деформуватися разом з матрицею без руйнування.

Волокна тугоплавких з'єднань SiC і Al_2O_3, що використовують як зміцнювач, мають відносно малу густину, високу питому міцність і термічну стабільність.

Унікально високу міцність мають ***монокристалічні волокна*** SiC і Al_2O_3 – ниткоподібні кристали («вуса»), що характеризуються досконалою будовою.

Для армування неметалевих матриць широко використовують ***скловолокно***. Воно має високу міцність, теплостійкість і корозійну стійкість, характеризується низькою температуроводністю й діелектричними властивостями, але володіє порівняно невисоким модулем пружності.

Меншу густину у порівнянні зі скловолокном і в три рази більший питомий модуль пружності мають ***органічні волокна***, які також застосовують для армування неметалевих полімерних матеріалів. Серед них найбільш перспективні ***волокна на основі ароматичного поліаміду***.

Одним з нових напрямів регулювання властивостей матеріалів є створення ***гібридних волокнистих композитів***, у яких здійснюється спільне армування волокнами з різними пружно-міцнісними властивостями (борними й сталевими, борними й скляними, вуглецевими й органічними та ін.).

Матриця волокнистого композиційного матеріалу зв'язує армуючі волокна в єдине ціле, захищає їх від ушкодження, передає на волокна навантаження. Від властивостей матриці залежить технологічний режим одержання композита, а також його щільність, міцність у напрямкові, поперечному до волокон, і його експлуатаційні характеристики.

Перевагами ***металевих матриць*** перед ***матрицями з органічних матеріалів*** є більш висока міцність, пластичність і ударна в'язкість, поліпшені технологічні й експлуатаційні властивості.

Як металеві матриці високої питомої міцності використовують ***легкі метали*** Al, Mg, Ti та їх сплави.

Другу групу композиційних матеріалів малої щільності й високої питомої міцності утворюють матеріали на неметалевій основі з волокнистими наповнювачами – ***полімерні композиційні матеріали***.

У виробництві полімерних композиційних матеріалів найбільше застосування дістали ***матриці на основі епоксидних і поліамідних зв'язуючих*** [9].

Залежно від типу наповнювача є кілька груп полімерних композиційних матеріалів.

Вуглепластики містять як наповнювач вуглецеві волокнисті матеріали. Особливістю вуглепластиків є підвищений опір утоми й віброміцність унаслідок їх високої демпфірувальної здатності.

Боропластики – полімерні композиційні матеріали, у котрих як наповнювач використовують борне безперервне моноволокно, а також комплексні боросклонити. Боропластики вирізняються високим модулем пружності, міцністю при розтяганні, згині й стисканні, великою динамічною й статичною витривалістю.

Органопластики – полімерні композиційні матеріали, армовані синтетичними волокнами з органічних полімерів. Органопластики легко переробляються у вироби різними технологічними методами. Основний недолік органопластиків – низька міцність і жорсткість при стисканні.

Склопластики – полімерні композиційні матеріали, у яких армуючими наповнювачами є склонити й склотканини. Особливість склопластиків – дуже висока міцність при розтяганні. Їхній головний недолік – порівняно низький модуль пружності.

РОЗДІЛ 5
ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

5.1 Точність обробки деталі

При обробленні заготовок велику увагу приділяють точності геометричних показників. Часто якість деталей оцінюють за точністю розміру. Витримування заданого розміру із жорсткими допусками на розміри не становить таких технічних труднощів, як забезпечення точності форми. Крім того, умови формоутворення деталей настільки складні, що одночасно може виникати низка відхилень від форми поверхонь. Важливою складовою частиною поняття «якість поверхневого шару» є мікронерівності поверхні, зумовлені технологічним процесом виготовлення деталей. Вони вирішальним чином впливають на експлуатаційні показники вузлів тертя машини в цілому.

Геометричні відхилення поверхонь оцінюють за відношенням кроку нерівностей до їхньої висоти. Залежно від числових значень цього відношення розрізняють шорсткість і хвилястість поверхонь. Якщо ці значення перевищують 1000, відхилення вважають макроскопічними.

Під ***точністю*** розуміють ступінь наближення дійсного значення параметра до його номінального значення. Точність деталей машин характеризується точністю розмірів елементів деталей, тобто окремих поверхонь, і точністю відносного розташування поверхонь [5, 71]. Розміри деталей на робочих кресленнях за своїм призначенням можуть бути розділені на групи.

Координувальні розміри використовують для визначення взаємного розташування поверхонь деталей, а також осей. Це, як правило, розміри відповідальних поверхонь, які визначають службове призначення деталі. Координувальні розміри ув’язують плоскі й циліндричні поверхні корпуса.

Складальні розміри використовують для визначення положення вузлів щодо інших елементів машини. Це насамперед розміри приєднувальних поверхонь.

Крім того, застосовують ***технологічні розміри***, які необхідні при виготовленні й контролі деталей.

Для того, щоб характеризувати точність розмірів, їх розділяють на номінальні, дійсні й граничні. Відносно номінального розміру визначають ***граничні*** розміри. ***Номінальний*** розмір визначає конструктор, виходячи зі службового призначення деталі. Отримані розрахунком розміри округляють до значень, що відповідають найближчим достатнім значенням рядів переважних чисел.

У реальному виробництві не можна абсолютно точно виконати номінальний розмір, а також виміряти його без похибки. Тому існує поняття ***дійсний*** розмір: це розмір, виміряний із допустимою похибкою. Дійсний розмір для оцінки якості продукції має особливе значення. Під час виготовлення деталі у кожний момент часу цей розмір має різні значення. Це пояснюється тим, що

технологічні системи, які при цьому використовують, уносять свої похибки у деталі, що виготовляються, оскільки вони працюють в умовах постійного зношування інструмента, а отже, силових факторів, що постійно змінюються, сприймають дію нестаціонарного теплового поля, змінної жорсткості систем. Крім цього, на точність деталей впливає похибка настроювання інструмента, встановлення оброблюваної заготовки та кілька інших факторів. Відносно номінальних з урахуванням дійсних визначають ***граничні*** розміри.

Допуском називають різницю між найбільшим і найменшим допустимими значеннями параметра, в цьому випадкові – розміру. Виготовлення деталей з дотриманням допусків сприяє створенню високоякісної машини, незважаючи на те, що кожна деталь обмежується поверхнями, розміри й форма яких відрізняються від номінальних. Метод вибору допусків розмірів має принципове значення.

Метод аналогів полягає в тому, що конструктор відшукує серед раніше сконструйованих і тих, які перебувають в експлуатації, машин та вузлів такі, у котрих є деталі аналогічні тим, що конструюються.

Розвитком методу аналогів є ***метод подібності***. Для призначення допусків цим методом відшукують подібність конструктивних ознак і умов експлуатації. Проте іноді буває складно встановити власне подібність, що обмежує застосування методу.

Найбільш обґрунтованим є ***розрахунковий метод***. Користуючись цим методом, призначають квалітети (класи, ступені точності) різних поверхонь деталей на основі фізичних явищ при експлуатації, зв’язаних найчастіше з контактуванням деталей у зібраній машині.

Кожна деталь характеризується нескінченно великою кількістю розмірів. Деталі лише на кресленнях характеризуються номінальними (ідеальними), а фактично обмежені реальними поверхнями. Деталі завжди мають відхилення форми. Забезпечення допустимого відхилення форми у виробничих умовах завжди ускладнене [13, 72].

5.2 Відхилення розмірів та форми деталі

У розв’язанні проблеми якості деталей необхідно опиратися на кількісні показники [5, 71]. На рисунку 5.1 схематично представлена деталь типу двоступінчастого вала. В будь-якому поперечному перерізі розміри вала визначають змінним радіусом R, відлічуваним від центра O номінального перетину діаметром $D_н$. Радіус R, що називається поточним розміром, залежить від кутової координати φ. Поточний розмір також змінюється за координатою z. Початкове значення радіуса обговорюється. Так, ним може бути радіус R_1 з кутовою координатою φ_1. Будь-який контур поперечного перерізу задовольняє умові замкнутості, тобто $f(\varphi) = (\varphi + 2\pi)$.

Реальний контур на лівому торці вала обмежується прилягаючою окружністю (штрихова лінія) діаметром $D_д$. Відхилення від круглості, характерне для кожного перетину, позначено $\Delta\Phi$. Для кожного перетину можна

визначити відхилення ΔD розміру. Прилягаюча окружність має центр у точці O_1. Тому дійсний контур деталі відрізняється від номінального (ідеального), а їх осі зміщені на відстань, рівну ексцентриситету e. Вісь дійсного контуру в загальному вигляді не є прямою лінією. Це характерне для будь-якого перетину ступеня вала A довжиною l_1.

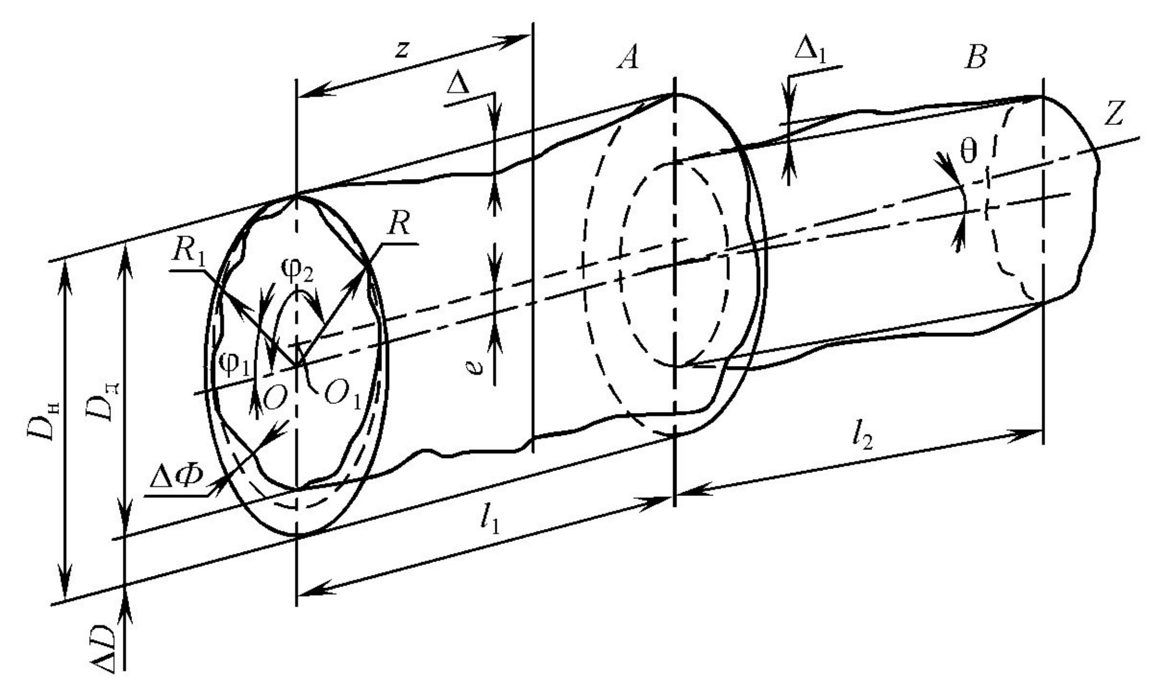


Рисунок 5.1 – Схема відхилень параметрів двоступінчастого вала

Для оцінювання якості деталі її форма має першорядне значення. Відхилення форми зручно описувати за допомогою рядів Фур'є. Залежність $f(\varphi)$ похибки дійсного профілю від кута повороту розглядається в полярній системі координат

$$f(\varphi)=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}\left(a_k\cos k\varphi+b_k\sin k\varphi\right), \qquad (5.1)$$

де $\frac{a_0}{2}$ – нульовий член розкладання; k – порядковий номер відповідної гармоніки; a_k, b_k – коефіцієнти ряду Фур'є k-ої гармоніки.

Замість рядів для фактичних цілей зручно користуватися тригонометричним поліномом

$$f(\varphi)=\frac{c_0}{2}+\sum_{k=1}^{n}c_k\left(\cos k\varphi+\varphi_k\right), \qquad (5.2)$$

де n – порядковий номер вищої гармоніки полінома. Величина $\frac{c_0}{2}$ може бути прийнята за середнє значення функції $f(\varphi)$ протягом періоду $T = 2\pi$ і визначається відстанню від базового значення поточного розміру до середньої лінії відхилень профілю. Тому значення $\frac{c_0}{2}$ являє собою відхилення розміру.

Перший член розкладання $c_1 \cos(\varphi + \varphi_1)$ характеризує відстань між центром обертання O_1 і геометричним центром O, тобто ексцентриситет e. Він указує на відхилення розташування поверхні та виражає його кількісно. Наступні члени полінома, починаючи із другого, характеризують спектр відхилень форми деталі у поперечному перерізі. Другий член $c_2 \cos(\varphi + \varphi_2)$ характеризує овальність перетину, а третій член $c_3 \cos(\varphi + \varphi_3)$ – огранку із трьохвершинним профілем і т. д. Тому перетин деталі слід представляти обкресленим контуром, що має відхилення розміру із центром, зміщеним від геометричного центра. Контур має овальну форму, на яку накладені огранки з різним числом вершин. Решта членів ряду характеризують відповідні хвилястість та шорсткість.

Наведені міркування справедливі й для ступеня B (див. рисунок 5.1) вала довжиною l_2. Однак у цього ступеня може виявитися своя вісь, повернена на кут θ у кожній із площин відносно осі z, а також можуть виникнути свої власні похибки. Відхилення профілів циліндричних поверхонь доцільно представляти й у поздовжніх перетинах. Умова замкнутості контуру тут не витримується.

Тригонометричний поліном для опису поздовжнього перетину можна застосувати, використовуючи циліндричну систему координат (координатами є R, φ, z). Умовно приймаємо, що період $T = 2l$ (l – довжина ділянки циліндричної поверхні). Поліном має вигляд

$$f(z) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{p} c_k \sin k\pi z / (2l), \qquad (5.3)$$

де k – порядковий номер члена розкладання.

Перший член розкладання показує, що при $z = 0$; $f(z) = 0$, а при $z = l$; $f_1(z) = c_1$. Отже, цей член характеризує конусоподібність, тому що твірна профілю має відповідний нахил. Другий член розкладання $f_2(z) = c_2 \sin \pi z / l$ характеризує опуклість контуру, а при зміщенні фази $f_2(z) = c_2 \sin \pi z / (l - \pi / 2) = c_2 \cos \pi z / l$, тобто він характеризує ввігнутість контуру. Так, на ступені A вала виникла сідлоподібність величиною Δ, а на ступені B – діжкоподібність Δ_1.

Профіль деталі в поздовжньому напрямку також являє собою складне поєднання конічних поверхонь із накладеними на них сідлоподібними, діжкоподібними, хвилястими профілями.

5.3 Відхилення розташування поверхонь

Якість деталей оцінюється також ***відхиленнями розташування поверхонь***, тобто відхиленнями реального положення поверхні від її номінального положення. При такій оцінці відхилення форми поверхонь деталей з розгляду виключаються, а реальні профілі заміняються прилягаючими. Реальні осі, центри реальних поверхонь, поверхні симетрії тощо заміняються прилягаючими елементами. Кожне з відхилень розташування поверхонь має своє точне визначення й методику виробничого оцінювання. Прилягаючими елементами можуть бути прямі, окружності, площини, циліндри.

Якість деталей за відхиленням від паралельності оцінюють за положенням двох прилягаючих до реальних поверхонь площин, вимірюючи відстань між цими площинами в різних місцях нормованої ділянки. Відхилення відстані поверхонь можуть визначатися за допомогою осей. На рисунку 5.1 ступені *A* і *B* вала практично мають криволінійні осі. Однак вони умовно представлені прямими. Взаємне розташування циліндричних ступенів визначається положенням їх осей (кут θ). У загальному випадкові осі можуть мати відхилення від паралельності, а також перекіс або відхилення від перетинання. Типовим для деталей, що мають отвори (наприклад, корпусних), є відхилення від співвісності. Таке відхилення вирішальним чином впливає на довговічність підшипників, установлених в отворах корпуса.

За допомогою прилягаючих елементів визначають відхилення від перпендикулярності. Воно, наприклад, оцінюється кутом між двома площинами, що прилягають до реальних поверхонь конкретної деталі. При оцінюванні відхилення від симетричності відносно базової площини визначають положення останньої й від нього вимірюють відстань до площини симетрії реального профілю.

Усі відхилення форми й розташування поверхонь повинні бути ранжировані стосовно конкретних деталей, виходячи з їхнього службового призначення. Так, в одному випадку вирішальний вплив на якість деталі мають відхилення від круглості, а в іншому – перекіс осей і т. д. Значення відхилень передбачають 16 ступенів точності. Значення допусків від одного ступеня до іншого збільшуються в 1,6 разу. Встановлені також рівні відносної точності, яка залежить від співвідношення між допуском розміру й допусками форми та розташування. Таких рівнів три: *A* – нормальна відносна точність, *B* – підвищена відносна точність і *C* – висока відносна точність. Для цих рівнів допуск форми або розташування в середньому становить відповідно 60, 40 та 25% допуску розміру. Для циліндричності, круглості й профілю поздовжнього перетину відносна геометрична точність для *A*, *B* і *C* становить відповідно 30, 20 і 12% допуску розміру.

Зазначені співвідношення виявляються досить корисними для практичних цілей. Допуск розміру, встановлений конструктором на основі розрахунків, експериментів або практичних спостережень, уже передбачає певні допустимі відхилення форми й розташування поверхонь. В особливих випадках допуски

форми і розташування обговорюються додатково в технічних умовах на виготовлення деталі. Виготовлення деталі із допустимими відхиленнями параметрів є основним завданням виробництва [13, 72].

У ході технологічних процесів механічної обробки формуються важливі показники надійності високоточних деталей: некруглість, нециліндричність, непаралельність, неперпендикулярність та інші відхилення від правильних геометричних форм, передбачені конструктором. Ці відхилення певним чином пов'язані з геометричною формою поперечних і поздовжніх перетинів деталей із взаємним розташуванням їх поверхонь. Тобто конструктивна форма деталей породжує зазначені відхилення або приводить до умов, у яких вони виникати не зможуть. Спадкування конструктивних форм полягає, насамперед, у виникненні, стійкому збереженні й передачі від однієї операції до іншої особливостей заготовок у різних перетинах.

Сутність спадкування зводиться до того, що заготовки, маючи залежно від конструктивних особливостей різну жорсткість або температурні деформації в різних точках, під дією сили різання чи нагрівання дістають у ході технологічного процесу або експлуатації різні переміщення, що спричиняє похибки форми готових деталей. Сюди відносять виникнення похибок від нерівномірної релаксації напружень, величина яких у різних точках заготовки пов'язана з особливостями конструктивних форм деталей. Особливе значення цей вид спадкування має для високоточних деталей у зв'язку з тим, що виникаючі похибки можуть порівнятися з допусками.

У переважній більшості випадків спадкування конструктивних форм є шкідливим явищем. Боротися з ним необхідно, передусім, за допомогою конструктивних заходів, для чого важливо визначити кількісні відхилення форм.

Найбільш типовим є випадок виникнення відхилення форми внаслідок змінної жорсткості заготовок, які обробляються на верстатах токарної або шліфувальної груп, тому що в загальному випадку заготовки не мають симетричних поперечних перерізів.

Типовими також слід уважати відхилення форми, які виникають при точінні, розточуванні та шліфуванні переривчастих поверхонь внаслідок того, що у зоні входу й виходу різального інструмента виникають характерні місцеві западини й виступи.

Змінна жорсткість оброблюваних заготовок часто є причиною виникнення коливань механічних систем. У цьому випадкові відхилення форми від правильних геометричних поверхонь мають досить складний характер і здебільшого визначаються експериментально.

Розрахунок відхилень форми при зміні температури оброблюваних заготовок виявляється досить складним навіть для деталей простих конфігурацій. Тому рекомендують експериментальні методи виявлення зв'язку конструктивних елементів і відхилень форми [13].

Розв'язання задач технологічної спадковості конструктивних форм деталі дозволяє в багатьох випадках позбутися трудомістких операцій, пов'язаних з доведенням високоточних деталей.

5.4 Макровідхилення та хвилястість поверхні

Зовнішній шар деталі, що має макро- і мікровідхилення від ідеальної геометричної форми та змінені фізико-хімічні властивості у порівнянні із властивостями основного матеріалу, називають ***поверхневим шаром***. Він формується при виготовленні й експлуатації і за глибиною може становити від десятих часток мікрометра до декількох міліметрів. Поверхневий шар характеризується геометричними характеристиками та фізико-хімічними властивостями [73, 74].

Під геометричними характеристиками розуміють макровідхилення, хвилястість, шорсткість та субшорсткість [73].

Оцінка геометричних характеристик може бути непараметричною і параметричною.

Непараметрична оцінка полягає в графічному зображенні макровідхилення, хвилястості, шорсткості й субшорсткості для візуального порівняння. Зокрема, для непараметричної оцінки шорсткості використовують профілограми, криві опорних довжин профілю, криві розподілу ординат або вершин профілю, спектрограми профілю, топограми і т. п.

При ***параметричній оцінці*** характеристик поверхневого шару деталей машин використовують як макро-, так і мікровідхилення.

Макровідхилення поверхні – нерівність висотою $10^{-2}…10^{3}$ мкм на всій її довжині або ширині.

Хвилястість поверхні – сукупність нерівностей висотою приблизно $10^{-2}…10^{3}$ мкм із кроком більшим, ніж базова довжина l, що застосовують для вимірювання параметрів шорсткості. Вона характеризується відхиленням кроку хвилі до висоти, яке коливається в умовних межах 50…1000. Амплітуди та кроки хвиль, як у поперечному, так і в поздовжньому (для циліндричних деталей) напрямках не є постійними й приблизно описують синусоїдою.

Макровідхилення (відхилення форми) характеризується: H_{max} – максимальним макровідхиленням, мкм; H_p – висотою згладжування макровідхилення (відстань від середньої лінії профілю до огинаючої), мкм.

Відхилення форми нормують значенням допуску форми поверхні й рекомендують визначати її взаємозв’язок з допуском на розмір. Хвилястість (рисунок 5.2) характеризується:

• W_a – середнім арифметичним відхиленням профілю хвиль, мкм

$$W_a = \left(\frac{1}{l_w}\right)\int_0^{l_w} |y_i|\,dx, \text{ або } W_a = \sum_{i=1}^{N} |y_i| / N, \qquad (5.4)$$

де l_w – базова довжина; y_i – поточне значення ординати профілю хвиль (відстань від точки профілю до середньої лінії); dx – приріст абсциси; N – число ординат профілю;

• W_z – середньою висотою хвиль, мкм

$$W_z = \left(\sum_{i=1}^{5} H_i + \sum_{i=1}^{5} H_i^{/} \right) / 5, \qquad (5.5)$$

де H_i – поточна відстань від середньої лінії до вершини хвилі; $H_i^{/}$ – поточна відстань від середньої лінії до западини хвилі;

- W_{max} – найбільшою висотою профілю хвиль, мкм;
- W_p – висотою згладжування хвилястості, мкм;
- t_{pw} – відносною опорною довжиною профілю хвиль, %

$$t_{pw} = \sum_{i=1}^{n} \eta_{pw_i} / l_w = \eta_{pw} / l_w, \qquad (5.6)$$

де η_{pw} – опорна довжина профілю хвиль на рівні перетину профілю p;

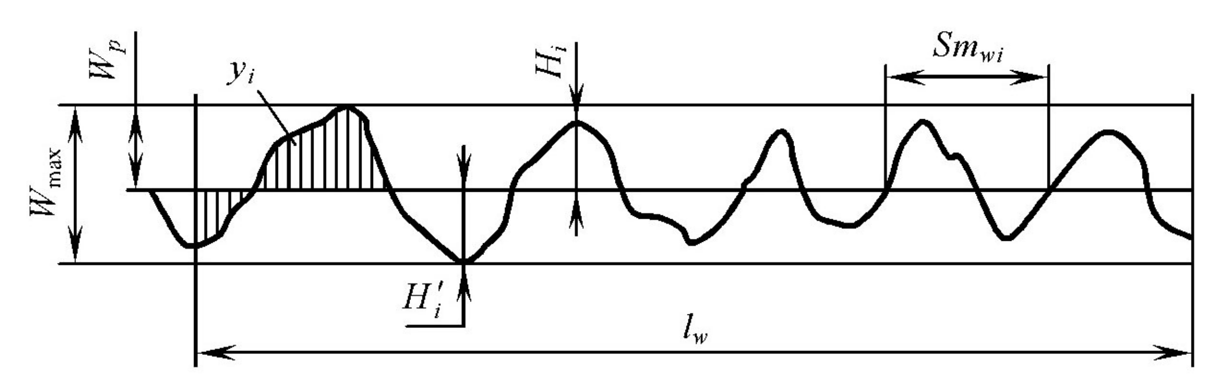


Рисунок 5.2 – Хвилеграма поверхні

- Sm_w – середнім кроком хвиль, мм

$$Sm_w = \sum_{i=1}^{n} Sm_{wi} / n, \qquad (5.7)$$

де Sm_{wi} – поточне значення кроку хвиль; n – число кроків;

- Rw_{cp} – середнім радіусом виступів хвиль, мм

$$Rw_{cp} = \sum_{i=1}^{n} Rw_i / n, \qquad (5.8)$$

де Rw_i – поточне значення радіуса виступу; n – число виступів хвиль.

Природа хвилястості зумовлена коливаннями технологічної системи в процесі механічної обробки [13, 75]. Однією із причин виникнення коливань і спадкування хвилястості є робота різального інструменту «по сліду». Хвилястість робочих поверхонь уважається неминучою. Вже при перших проходах виникають хвилі, й подальші проходи виконують по хвилястій

поверхні. Технологічне спадкування полягає в тому, що «сліди» хвиль від попереднього проходу породжують нові хвилі на оброблюваній поверхні.

При різанні «по сліду» товщина шару матеріалу, який зрізується, змінюється, що спричиняє зміну сили різання. Завжди наявна на поверхні заготовок хвилястість є причиною коливання сил різання. Коливні сили різання приводять до нового утворення хвилястості. Таке явище характерне як для випадку обробки різцями, так й іншими різальними інструментами. Винятком є різання з одержанням елементних стружок або при утворенні нестійкого наросту.

Передача при технологічному спадкуванні у таких випадках може представлятися за допомогою виразу, що описує товщину зрізу

$$A = -\left[x(\tau) - x\left(\tau - T_p\right) \right], \qquad (5.9)$$

де $x(\tau)$ – функція, яка описує у часі τ хвилястість оброблюваної поверхні; $x\left(\tau - T_p\right)$ – функція для початкової поверхні, яка має сліди у вигляді хвилястості, з урахуванням постійної часу стружкоутворення T_p.

Іншою причиною виникнення хвилястості є перенесення геометричних похибок абразивного інструмента на заготовку. Шліфувальний круг є своєрідним інструментом, у якого число зубів дорівнює числу хвиль на його робочій поверхні. Хвилястість на шліфувальних кругах може утворюватися в процесі їх виправлення. Величина хвилі на заготовці пов’язана з її коливаннями у відповідності до жорсткості технологічної системи. Про технологічне спадкування тут можна говорити в тому розумінні, що хвилястість круга приводить у певних областях власних частот коливань системи й режимів шліфування до її ж подальшого розвитку і внаслідок цього до збільшення хвилястості на заготовці [13, 75].

5.5 Шорсткість та субшорсткість поверхні

Сучасна система оцінювання мікрорельєфу поверхні відповідно до існуючих стандартів дозволяє призначити шорсткість залеж-но від експлуатаційних властивостей деталі.

Під ***шорсткістю поверхні*** розуміють сукупність нерівностей висотою близько $10^{-2}…10^{3}$ мкм із кроком меншим, ніж базова довжина, що використовується для її вимірювання.

Субшорсткість – це субмікронерівності висотою приблизно $10^{-3}…10^{-2}$мкм, що накладаються на шорсткість поверхні [73, 74].

Шорсткість (рисунок 5.3) характеризують такі стандартизовані параметри:

• *Ra* – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм

$$Ra = \left(\frac{1}{l}\right)\int_0^l |y_i| dx \text{ або } Ra = \sum_{i=1}^{N} |y_i| / N, \tag{5.10}$$

де l – базова довжина; y_i – поточна величина ординати профілю шорсткості; N – число розглянутих координат профілю шорсткості;

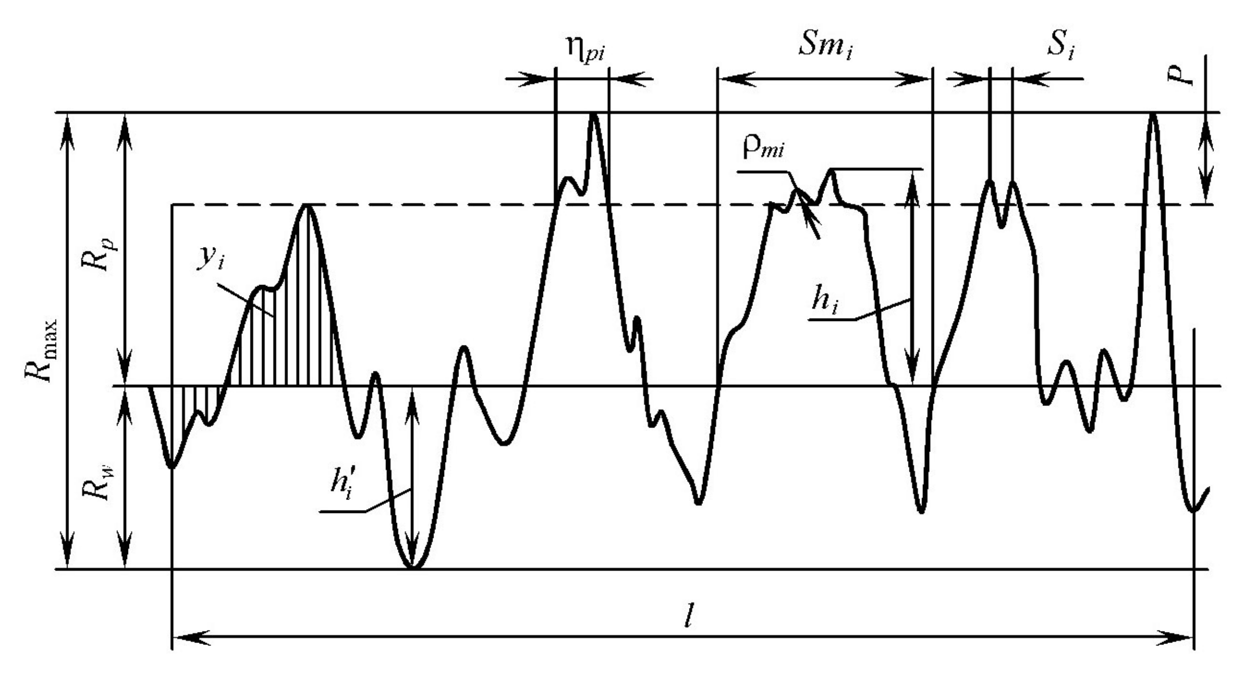


Рисунок 5.3 – Профілограма шорсткості поверхні

- Rz – висота нерівностей профілю за десятьма точками, мкм

$$Rz = \frac{\left(\sum_{i=1}^{5} h_i + \sum_{i=1}^{5} h_i^{/}\right)}{5}, \tag{5.11}$$

де h_i – висота i-го найбільшого виступу профілю; $h_i^{/}$ – глибина i-ої найбільшої западини профілю;

- R_{max} – найбільша висота профілю, мкм;
- Sm – середній крок нерівностей профілю, мм

$$Sm = \sum_{i=1}^{n} Sm_i / n, \tag{5.12}$$

де Sm_i – значення i-го кроку нерівностей по середній лінії у межах базової довжини;

- S – середній крок місцевих виступів профілю, мм

$$S=\sum_{i=1}^{n} S_i \ / \, n, \tag{5.13}$$

де S_i – значення *i*-го кроку по вершинах місцевих виступів;

• t_p – відносна опорна довжина профілю, %

$$t_p=\sum_{i=1}^{n}\eta_{p_i} \, / \, l=\eta_p \, / \, l, \tag{5.14}$$

де η_p – опорна довжина профілю на рівні *p*.

Нестандартизовані параметри шорсткості:

• R_q – середнє квадратичне відхилення профілю, мкм

$$R_q=\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)\int_0^l y_i^2 dx} \text{ або } R_q=\sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2 \, / \, n}, \tag{5.15}$$

• R_p – висота згладжування профілю шорсткості, мкм;

• R_v – глибина згладжування профілю шорсткості, мкм;

• K_p – коефіцієнт заповнення профілю;

• v і b – параметри початкової ділянки кривої відносних опорних довжин профілю

$$\eta_p=b\left(\frac{p}{100}\right)^v, \tag{5.16}$$

• ρ_m – середній радіус виступів профілю, мкм, (рисунок 5.4)

$$\rho_m=\sum_{i=1}^{n}\rho_{mi} \, / \, n, \tag{5.17}$$

де ρ_{mi} – радіус *i*-го виступу профілю шорсткості;

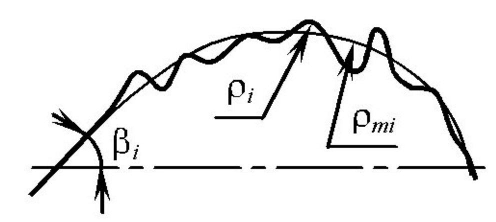


Рисунок 5.4 – Профілограма шорсткості поверхні

• ρ – середній радіус місцевого виступу профілю шорсткості, мкм, (рисунок 5.4)

$$\rho = \sum_{i=1}^{n} \rho_i / n, \quad (5.18)$$

де ρ_i – радіус i-го місцевого виступу профілю;

• β – середній кут профілю шорсткості (див. рисунок 5.4)

$$\beta = \sum_{i=1}^{n} \beta_i / n, \quad (5.19)$$

де β_i – кут нахилу i-го виступу профілю.

Параметри субшорсткості:

• $R_{max\ c}$ – максимальна висота нерівностей субшорсткості, мкм;

• Sm_c – середній крок нерівностей субшорсткості.

Крім того, стан поверхневого шару описується $h_{\sigma 0}$ – глибиною залягання поверхневих залишкових напружень, мм.

Для оцінювання наклепу використовуються: $H_{\mu 0}$ – поверхнева мікротвердість; $U_н$ – ступінь наклепу, %

$$U_н = \frac{H_{\mu 0} - H_{\mu\ поч}}{H_{\mu\ поч}} \cdot 100, \quad (5.20)$$

де $H_{\mu\ поч}$ – початкова мікротвердість матеріалу; ε – ступінь деформування, %; $h_н$ – глибина наклепу, мкм.

Для оцінювання структури застосовують:

$l_з$ – розмір зерен, мкм;

ρ_D – густина дислокацій, см$^{-2}$.

5.6 Залежності експлуатаційних властивостей від параметрів рельєфу

Багаточисленними дослідженнями й промисловими випробуваннями встановлено, що залежності параметра «мікрорельєфу – експлуатаційна властивість» нелінійні (рисунок 5.5) [76]. Це ускладнює задачі вибору варіанта мікрорельєфу, якщо врахувати надзвичайно велике число поверхонь, що реально експлуатуються.

Усі експлуатаційні властивості, що визначають надійність виробів, залежать від [5, 73, 74, 77, 78]:

• характеристик властивостей матеріалів: $\sigma_в$, $\sigma_т$, E, HB;

• розмірів та їх точності: d, l, B, T;

• системи геометричних параметрів робочих поверхонь: макровідхилення – H_{max}, H_p, хвилястості – W_z, W_p, Sm_w, хвилястості – Ra (Rz), R_{max}, R_p, Sm, S, t_p, субшорсткості – $R_{max\ c}$, $Sm_{max\ c}$, їх взаємного положення при контактуванні;

• фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів: $\sigma_{зал}$, $h_{\sigma 0}$, $H_{\mu 0}$ ($U_н$), ε, $h_н$, $l_з$, ρ_D (таблиця 5.1).

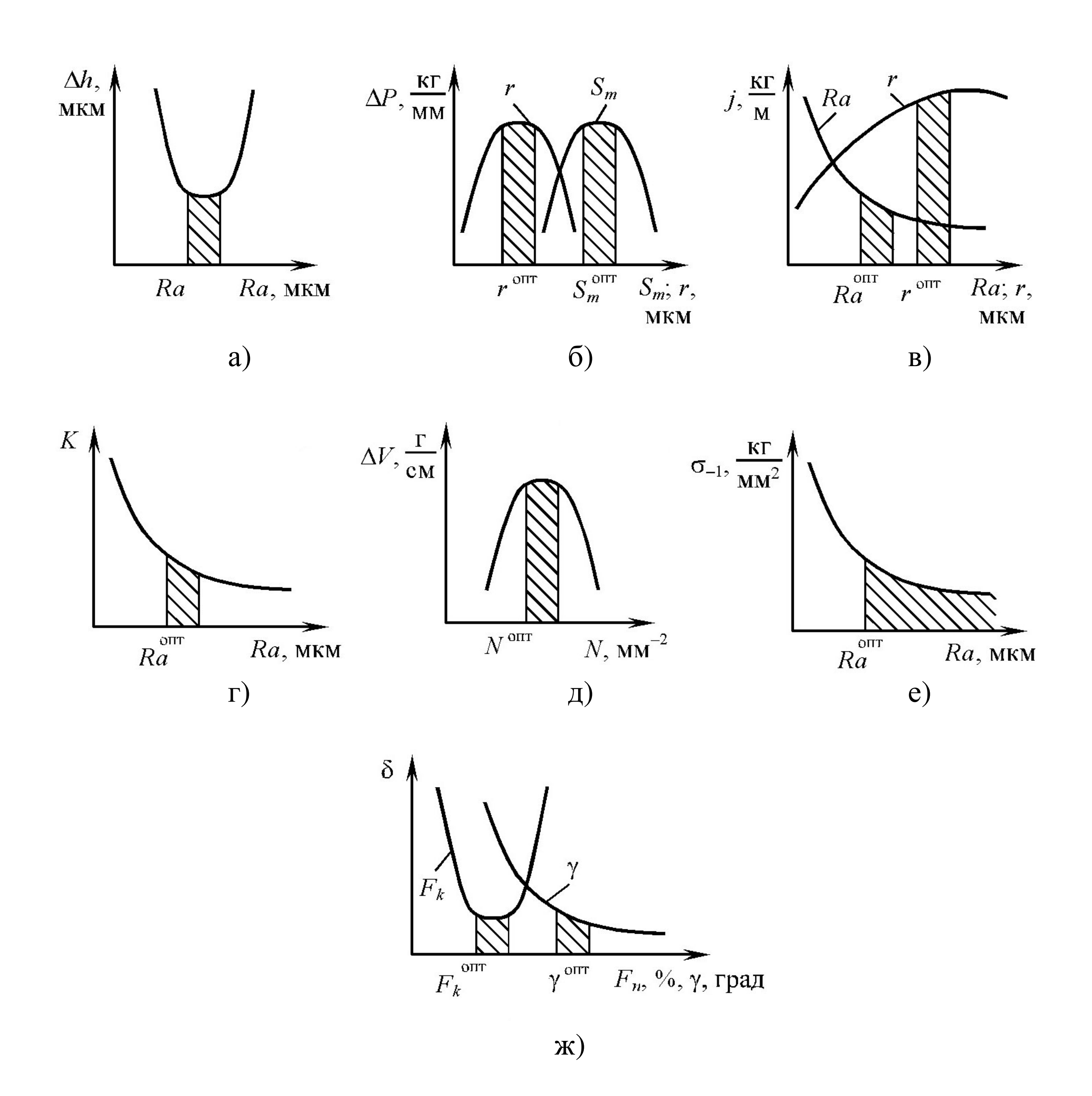


Рисунок 5.5 – Типові експериментальні залежності експлуатаційних властивостей деталей від значень параметрів мікрогеометрії поверхні:
(r – радіус заокруглення вершин нерівностей; N – число елементів регулярного мікрорельєфу на одиницю поверхні; F_k – відносна площа поверхні, що займається заглибленнями; γ – кут напрямку розташування елемента мікрорельєфу): а – знос; б – міцність посадок; в – контактна жорсткість; г – корозійна стійкість; д – гідрощільність; е – втомна міцність; ж – плавність ходу

Таблиця 5.1 – Параметри, що визначають експлуатаційні властивості деталей машин та їх з’єднань

Експлуатаційні властивості		Контактна жорсткість: перше навантаження	Повторне навантаження	Коефіцієнт тертя	Зносостійкість	Герметичність з’єднань	Міцність посадок	Міцність деталей	Утомна міцність	Корозійна стійкість	Поверхнева теплопровідність	Термостійкість
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Властивості матеріалів	$\sigma_в$	0	0	+	+	0	0	+*	+	0	-	+
	$\sigma_т$	+	0	+	+	-	-	+	+*	0	-	+
	E	+	+	+	+	-*	+*	+*	+	0	0	+
	HB	+	-	+	+	-	-	-	-*	0	0	+
Розмір і його точність	d, l, B	+*	+*	0	+	-*	+*	+*	+*	0	+*	+
	T	-*	-*	0	-*	-*	-*	0	0	0	-*	0
Параметри стану поверхневого шару	$H_{\max}$	-	-	+	-	-	-	0	0	0	-*	0
	H_p	-*	-*	+*	-*	-*	-*	0	0	0	-*	0
	W_z	-	-	+	-	-	-	0	0	-	-*	0
	W	-*	-*	+*	-*	-*	-*	0	0	-	-*	0
	Sm_w	-	-	-	-	-	-	0	0	+	-	0
	Ra, Rz	-	-	+	-	-	-	-	-	-*	-*	-
	$R_{\max}$	-	-	+	-*	-	-	-*	-*	-	-	-
	R_p	-*	-*	+*	+*	-*	-*	-	+	-	-*	-
	t_p	+*	+*	-*	+*	+*	+*	+	-	+	+*	+

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Параметри стану поверхневого шару	Sm	+	+*	-	+	-*	-	+*	+*	+*	-	+
	S	0	0	-	-	-	0	0	0	+*	-	0
	$R_{\max}$	0	0	+	-	-	-	0	0	-*	-*	0
	Sm_c	0	0	-	+	-	0	0	0	+*	-	0
	$\sigma_{зал}$	+*	-	-	+*	-	-	+*	+*	-*	-	-
	$h_{\sigma 0}$	0	0	0	0	0	0	+*	+*	-	-	0
	$H_{\mu 0}\ U_н$	+*	-	+*	+*	-*	-*	+*	+*	-	-	-
	$h_н$	0	0	0	0	0	0	+*	+*	-	-	0
	ε	-*	-*	+	+*	0	0	+	+	-	-	-
	$l_з$	-*	-*	-	-*	0	0	-*	-	+	+	-
	ρ_D	-*	-*	-	-*	0	0	-*	-	-	-	-

Позначення: збільшення «+» або зменшення «–» цих параметрів спричиняє поліпшення або погіршення експлуатаційної властивості: * – параметр чинить основний вплив і «0» – параметр не впливає на експлуатаційну властивість

Ураховуючи, що з характеристик стану поверхневого шару стандартизована тільки шорсткість, у таблиці 5.2 наведено її параметри, рекомендовані для проставляння на робочих кресленнях деталей машин [5].

Таблиця 5.2 – Рекомендовані параметри робочих поверхонь деталей машин

Експлуатаційні властивості	Параметри шорсткості робочих поверхонь	
Контактна жорсткість	$Ra, Sm, t_p, \left(R_p\right)^n$	Напрямок нерівностей (//, ⊥)
Зносостійкість	$Ra, Sm, t_p, \left(R_p\right)$	
Міцність	$R_{\max}$, Sm	
Утомна міцність		
Контактна міцність	$Ra, Sm, t_p, \left(R_p\right)$	
Фретингостійкість		
Вібростійкість		
Корозійна стійкість	Ra, Sm, S	-
Міцність зчеплення покриття	Ra, Sm	-
Герметичність з’єднань	$Ra, Sm, t_p, \left(R_p\right)$	Напрямок нерівностей (//, ⊥)
Міцність посадок	$Ra, t_p, \left(R_p\right)$	
Теплопровідність	$Ra, Sm, t_p, \left(R_p\right)$	

Для деталей, що працюють в умовах зношування, найбільш важливими характеристиками виявляються: середнє арифметичне відхилення профілю, середній крок нерівностей профілю по середній лінії та відносна опорна довжина профілю. Для деталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, найбільш важливою є найбільша висота профілю, а для забезпечення високої міцності зчеплення покриття з основою – висоти нерівностей профілю за десятьма точками. Окремо необхідно передбачити напрямок слідів обробки на поверхні деталі, а також взаємне розташування цих слідів на поверхнях, що сполучаються.

Суттєвими є значення висоти й форми одиничних мікронерівностей поверхні, тому що від цих параметрів, насамперед, залежать величини зближення контактуючих деталей під дією навантаження, а також процес їх зношування. Форма профілю породжується особливостями методу обробки поверхні. Тому в питаннях визначення зношування і контактної жорсткості першорядну роль відіграють технологічні методи обробки.

Призначення методів обробки деталі залежно від заданих характеристик шорсткості надзвичайно складне. Для практичних цілей кількісні залежності виникаючої після обробки шорсткості й умов обробки одержують двома методами.

Теоретичним шляхом досліджують фізичні явища, що відбуваються в поверхневому шарі при обробленні. Експериментальними дослідженнями одержують статистичні моделі. Такі моделі розроблені для всіх основних методів оброблення заготовки. Шорсткість поверхні не завжди є тим параметром, який безпосередньо успадковується. З кожним новим проходом інструмента виникає свій мікропрофіль, практично не пов’язаний з попереднім.

У процесі формування шорсткості важливу роль відіграють властивості оброблюваного матеріалу. Зміна шорсткості поверхні в цих випадках відбувається одночасно зі зміною зносостійкості поверхневих шарів у результаті структурних перетворень, що відбуваються в ході технологічного процесу, головним чином під впливом термічних впливів. Вплив технологічної спадковості на формування мікропрофілю може бути розглянутий у такому аспекті. Усі параметри поверхні складаються під дією сукупності факторів, що одночасно проявляються. Проте можна виділити із профілю поверхні ті його параметри, які виникли в результаті дії одного цілком визначеного фактора.

Такий спадковий зв’язок можна встановити за допомогою спектральної теорії, яка дозволяє на основі аналізу спектра нерівностей виділити ті складові профілю, які домінують по амплітудах. У результаті визначається інтервал кроків нерівностей, що відповідає домінуючій гармоніці. Ця гармоніка виникає у результаті впливу механічних діянь, частоти яких у перерахуванні на кроки лежать у зазначеному інтервалі [13, 71].

РОЗДІЛ 6
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

6.1 Спадкування властивостей поверхневого шару

Різноманітні методи механічної обробки при однаковій шорсткості можуть створювати в поверхневих шарах різну структуру матеріалу. Зміна при цьому твердості поверхневого шару істотно впливає на міцність деталей і зносостійкість поверхонь тертя. За допомогою технологічних методів можна керувати твердістю поверхневих шарів. Виникаючий у процесі механічної обробки наклеп поверхні породжує структурно нестійкий стан металу, який із часом намагається повернутися до вихідного. Тому вплив наклепу поверхонь при механічній обробці багатьох матеріалів на зносостійкість досить суттєвий [12, 75].

Конструктивні елементи в місцях їх поєднань приводять до виникнення складної картини нерівномірного напруженого стану в поверхневих шарах деталі. Нерівномірність розподілу напружень є однією з головних причин деформації високоточних деталей у процесі їх обробки, зберігання й експлуатації [13].

У таких випадках залежності деформації та напружень виявляються більш складними, аніж це стверджується законом Гука [18, 19]. Тому в законі деформування відображається явище повзучості [79, 80]:

$$End\varepsilon / d\tau + H\varepsilon = nd\sigma / d\tau + \sigma, \tag{6.1}$$

де E – миттєвий модуль пружності; $n = K/E$, K – постійний коефіцієнт; H – тривалий модуль пружності; σ – напруження; ε – деформація.

Якщо на деталь діє постійне навантаження σ = const, розв’язок рівняння має вигляд

$$\varepsilon = \sigma / H + \sigma\left(1/E - 1/H\right)\exp\left[-H\tau / \left(En\right)\right]. \tag{6.2}$$

Оскільки величина ($1/E - 1/H$) від’ємна, значення ε з часом зростає [13].

Для довільного закону напружень

$$\varepsilon(\tau) = \frac{1}{E}\left[\sigma(\tau) + \int_{-\infty}^{\tau} \sigma(\tau) K(\tau - t)\, dt\right], \tag{6.3}$$

де $K(\tau - t) = (E - H)/(En)\exp\left[-H(\tau - t)/(En)\right]$.

У результаті можна розглядати матеріал будь-якої деталі з урахуванням усіх навантажень, які мали місце до моменту часу τ. Тому формула виражає спадкову залежність деформації від напружень. У зв’язку з підвищенням вимог

точності параметрів деталей значний інтерес становить розгляд повзучості навіть при кімнатних температурах.

6.2 Фізико-механічні та геометричні параметри поверхневого шару

Важливу роль у забезпеченні фізико-механічних і геометричних параметрів поверхневого шару відіграють закономірності формування залишкових напружень на робочих поверхнях деталей. Технологічна спадковість тут проявляється значною мірою.

У розподілі напружень по глибині після фінішної операції доведення спостерігаються загальні риси, властиві для епюр залишкових напружень після всіх попередніх видів обробки: чистового й навіть попереднього точіння [12, 13].

Фінішні операції, що супроводжуються порівняно малим пластичним деформуванням, впливають більшою мірою на залишкові напруження поверхневих шарів глибиною до 10 мкм. Вплив попередніх операцій, для яких характерна наявність значних силових і температурних факторів, поширюється на більшу глибину. Починаючи із глибини 30 мкм епюри після всіх операцій технологічного процесу практично збігаються (рисунок 6.1).

Розрізняють вади спадкового походження, такі як пори, включення та зональні перетворення структури, вони ведуть до утворення залишкових напружень. Кожна вада або зона зі зміненою структурою приводять до утворення концентратора напружень. Особливу роль тут відіграють припікання поверхні, що виникають від засолювання круга, надмірно жорстких режимів або інших причин. На поверхні деталі в місці припікання з’являється плівка окислу, що визначається за кольорами мінливості, товщина якої виміряється частками мікрометра. Подальші операції або переходи знімають цю плівку, створюючи часом видимість усунення припікань.

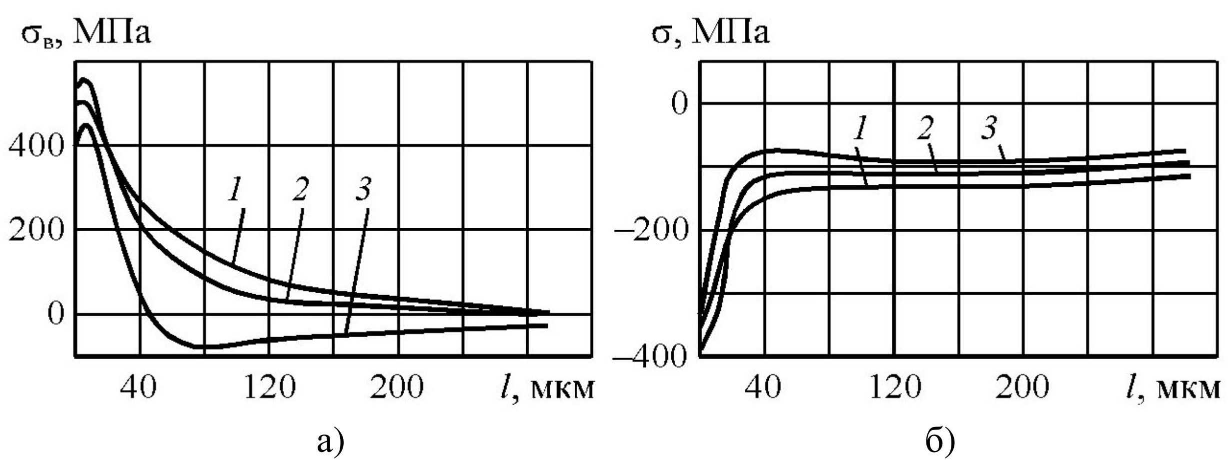


Рисунок 6.1 – Залежності розподілу залишкових напружень у поверхневих шарах різних заготовок зі сталі 20Х:
а – після токарної обробки; б – після термообробки;
1 – прокат; 2 – поковка; 3 – труба

Часто обробка заготовок лезовим інструментом на попередніх операціях супроводжується наростоутворенням [14, 67]. За певних умов виникає молекулярне схоплювання наросту й оброблюваної поверхні. У таких випадках наріст-задир глибоко проникає в поверхню і для повного його видалення потрібне зняття відповідного шару металу. Це не завжди виконується, тому що місцеві вади не враховуються при призначенні припусків [13].

До вад робочих поверхонь також слід віднести своєрідний «висип», що створюється переносом на них часток матеріалу інструмента. Такі інструменти, як різці, фрези, зенкери, зношуючись за певних умов, переносять свої частки на заготовку. Причому зв'язок цих часток з поверхнею заготовки дуже великий. Це також стосується і обробки поверхонь вільним абразивом, що наявне при доведенні деталей [13, 75].

Процеси формування геометричних і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей є досить складними і їх, безумовно, слід розглядати в спадковому плані. Тому технологам слід уживати необхідні заходи для того, щоб забезпечити умови для одержання добре прокованих заготовок високоточних валів, а всі операції термічної обробки проводити при їхньому вертикальнім положенні. Чорнову й чистову обробку деталей типу столів робити з установкою на постійні та підведені опори. Закріплення корпусів для операцій механічної обробки треба виконувати за допомогою пристосувань, що забезпечують одночасність прикладання затискних сил. Уважається доцільним проводити обробку деталей типу кілець і гільз із тим розрахунком, щоб вони, будучи встановленими на технологічне оснащення, отримували такі ж натяги, що й при наступному складанні. Для високоточних деталей, щоб уникнути появи додаткових напружень, забороняється виправлення заготовок [12, 13, 72, 75].

6.3 Комплексне оцінювання стану поверхневого шару

З метою прогнозування експлуатаційних властивостей деталей машин і керування ними велике значення має розроблення методів комплексного оцінювання стану поверхневого шару за критеріями, що інтегрально враховують геометричні параметри, механічні властивості й структуру поверхневого шару після обробки, які основані на статистичній обробці великого масиву даних. Особливо це актуальне для обробки матеріалів з гетерогенною структурою та нестабільними властивостями.

Таке оцінювання проводиться на підставі результатів, отриманих деформаційно-спектральним методом мікромеханічних випробувань (рисунок 6.2, а) [81] та досліджень екзоелектронної емісії з обробленої поверхні (рисунок 6.2, б) [82].

Представивши модель поверхневого шару покриття як систему випадково розподілених структурно-енергетичних бар'єрів різної потужності, що перешкоджають поширенню пружнопластичних деформацій, рівень і стабільність міцнісних та деформаційних властивостей матеріалу оцінюють комплексом чисельних характеристик. При випробуваннях за деформаційно-

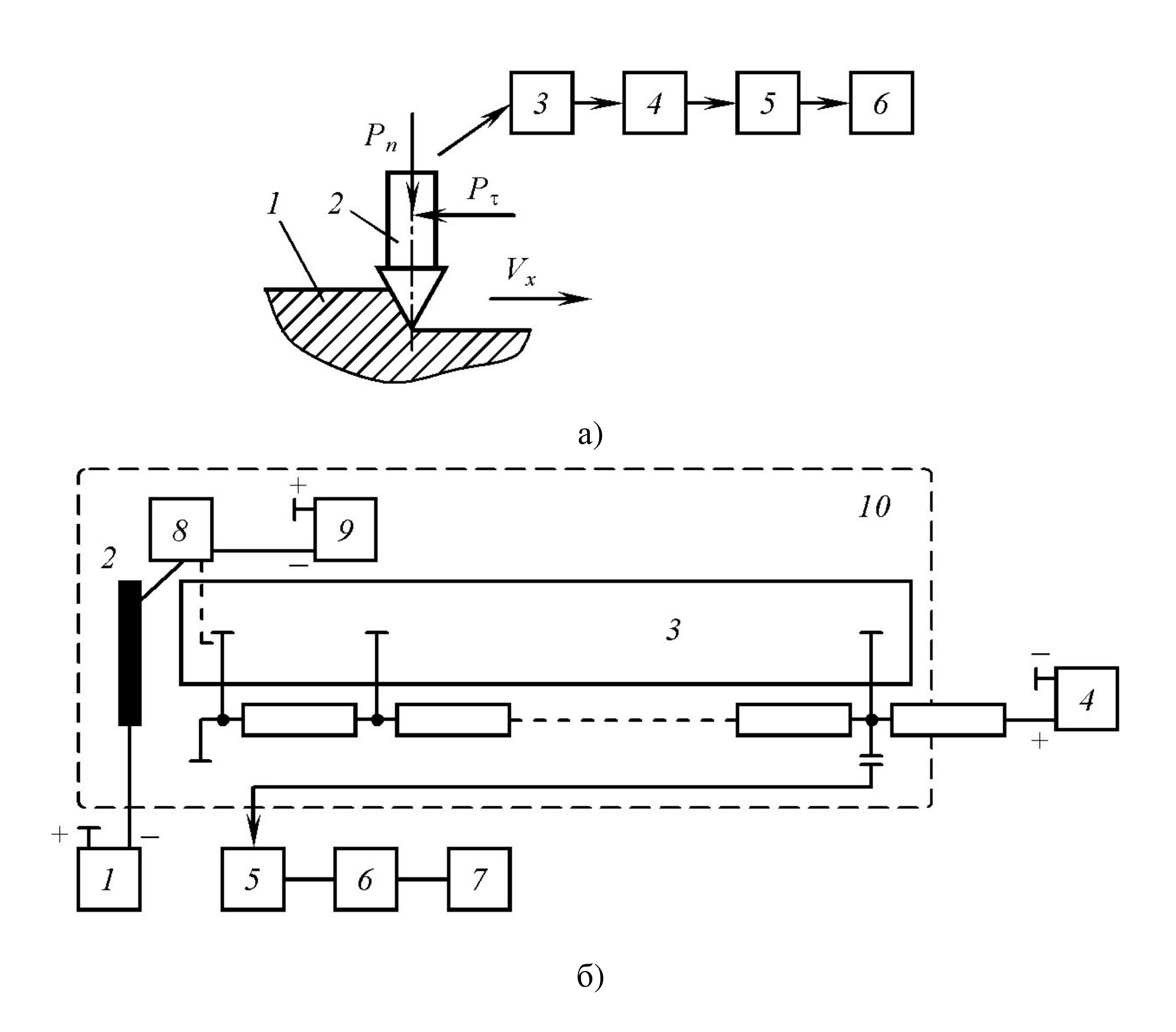


Рисунок 6.2 – Схеми експериментальних установок:
а – для деформаційно-спектрального аналізу: 1 – зразок; 2 – індентор; 3 – перетворювач; 4 – підсилювач; 5 – вимірювальна система; 6 – ЦОМ; V_x – швидкість сканування; P_n, P_τ – відповідно нормальна і тангенціальна складова сили контактної взаємодії індентора з досліджуваним поверхневим шаром; б – для дослідження екзоелектронної емісії з поверхні: 1 – джерело живлення; 2 – зразок; 3 – вторинний електронний помножувач; 4 – випрямляч; 5 – передпідсилювач; 6 – підсилювач; 7 – перерахункова система; 8 – фотостимулюючий зонд; 9 – джерело живлення зонда; 10 – вакуумна камера

спектральним методом поверхневий шар матеріалу в режимі пружнопластичного деформування сканується нормально навантаженим алмазним індентором та фіксуються статистичні характеристики опору його рухові. До них належать: m_τ – математичне очікування тангенціальної складової сили контактної взаємодії індентора з поверхнею, що є аналогом оцінки мікротвердості матеріалу, D_τ – дисперсія сил контактної взаємодії, що характеризує розкид середньої потужності, яка витрачається на процес деформування поверхневого шару, S – енергетична спектральна густина

розподілу сили, що характеризує особливості деформованого поверхневого шару в зв’язку з розміром областей рівної міцності або однакового рівня напруженого стану, а також зміни деформаційних і міцнісних властивостей поверхневого шару вздовж траси сканування, $f_{сер}$ – середня частотна складова, що відповідає 50%-ому рівню енергії процесу контактної взаємодії, тобто такому, що ділить спектр процесу на дві рівні за площею частини, що відповідає рівності енергії низько- і високочастотних складових спектра.

Екзоелектронна емісія як фізичний процес являє собою нестаціонарну низькотемпературну емісію, що виникає з поверхні твердих тіл при її збудженні. Метод оснований на реєстрації й аналізі параметрів емісії електронів, що вилітають зі збудженої поверхні матеріалу при додатковому низькоенергетичному збудженні (наприклад, світловим зондом). Інтенсивність екзоструму з поверхні J після механічної обробки характеризує ступінь деформаційного збудження мікрооб’ємів поверхні, що викликає структурні зміни, які визначають фізико-хімічні властивості поверхневого шару. Мірою неоднорідності енергетичного стану поверхні є емісійна неоднорідність

$$\eta = \frac{1}{J}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\frac{J_i - \overline{J}}{n}}\,, \tag{6.4}$$

де J_i і $\overline{J}$ – відповідно інтенсивність екзоструму в i-й точці поверхні та середня; n – число вимірів.

Зазначені показники є параметрами, що комплексно характеризують стан поверхневого шару – його зміцнення, напружено-деформований стан, дефектність та особливості структури.

Деформаційно-спектральні характеристики й параметри поверхневого шару чутливі до зміни стану поверхневого шару і дозволяють зробити висновок про відповідність стану поверхневого шару, який формується, контактним навантаженням в експлуатації.

6.4 Припуски на механічну обробку

Видалення різних за величиною шарів матеріалу – знімання нерівномірних припусків, практично завжди супроводжує механічну обробку деталей. Визначення припусків становить важливу техніко-економічну проблему [72, 75]. Традиційно проміжні або загальні мінімальні припуски z_i розраховують за формулою [83]:

$$z_{i\,\min} = Rz_{i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i\,, \tag{6.5}$$

де Rz_{i-1} – висота нерівностей; T_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару; ρ_{i-1} – просторове відхилення оброблюваної поверхні відносно базових поверхонь заготовки; ε_i – похибка установки. Індекс i ставиться до

виконуваного переходу і являє собою його порядковий номер; $i - 1$ – ставиться до параметрів, що виникають на попередній операції.

Це безпосереднім чином указує на те, що у своїй сутності величина припуску визначається тим станом заготовки, який мав місце у минулому. Тому при виконанні цього переходу припуском повинні бути враховані всі ті параметри, отримані в ході формування заготовки, які не можуть позитивно впливати на якість деталі, а також похибку, що виникла на вказаному переході.

Величина T і характер залягання дефектного шару на першому переході повністю визначають методом виготовлення заготовки. Цей шар, як правило, не має постійної глибини й може змінюватися відповідно до конструктивних особливостей деталі. Призначати цей шар для розрахунків припусків при виготовленні деталей необхідно з урахуванням явищ технологічної спадковості.

Параметр ρ також має спадкову природу. Він безпосередньо пов’язаний з методом і особливостями одержання заготовки. Наявність просторових відхилень приводить до зняття нерівномірних шарів матеріалу, що пов’язане з надійністю роботи готових деталей, тому що внаслідок нерівномірного знімання припуску утворюється несиметричне положення епюр залишкових напружень.

Ефект появи відхилень форми, так само як просторових відхилень, залежно від нерівномірності знімання припуску є досить відчутним на термооброблених високоточних деталях. Так, для високоточних азотованих валів нерівномірність припуску визначають похибкою розташування центрових отворів. У процесі шліфування виникає нагрівання поверхневих шарів у різних зонах вала в різній мірі. При високих температурах можливий процес деазотування, що супроводжується зниженням твердості й зменшенням залишкових напружень [13]. Нерівномірність припуску в 0,02 мм при шліфуванні приводить до поводки валів у процесі експлуатації. Напрямок поводки пов’язаний з розташуванням зони найбільшого й найменшого припусків. Це особливо помітно, якщо нерівномірність припуску проявляється не тільки на шийках такого вала, але й по всій його довжині [12, 13].

Таким чином, при призначенні операційних припусків особлива увага повинна бути приділена операціям термічної й хіміко-термічної обробки, тому що нерівномірність зміненого шару може привести до поводок ще більшою мірою, ніж нерівномірність припуску для механічної обробки.

У разі призначення припуску на обробку деталей із захисними покриттями необхідно враховувати особливості структури й властивостей останніх, зокрема те, що шар покриття має нестабільні властивості та товщиною (рисунок 6.3). Застосування в таких умовах розрахунково-аналітичного методу оцінювання величини припуску не дозволяє це врахувати.

Ураховуючи, що захисні покриття найчастіше використовують для підвищення зносостійкості деталей, що у багатьох випадках працюють за наявності абразивних часток, більшій мікротвердості покриття відповідає його менше зношування. Тому процес механічної обробки повинен вестися так, щоб з поверхні деталі видалявся шар покриття з меншою твердістю, а до обробленої поверхні примикав шар покриття з підвищеними механічними властивостями.

Для одного й того самого покриття розташування зони з підвищеними механічними властивостями залежить від товщини шару покриття, а для різних матеріалів покриттів також і від їх твердості.

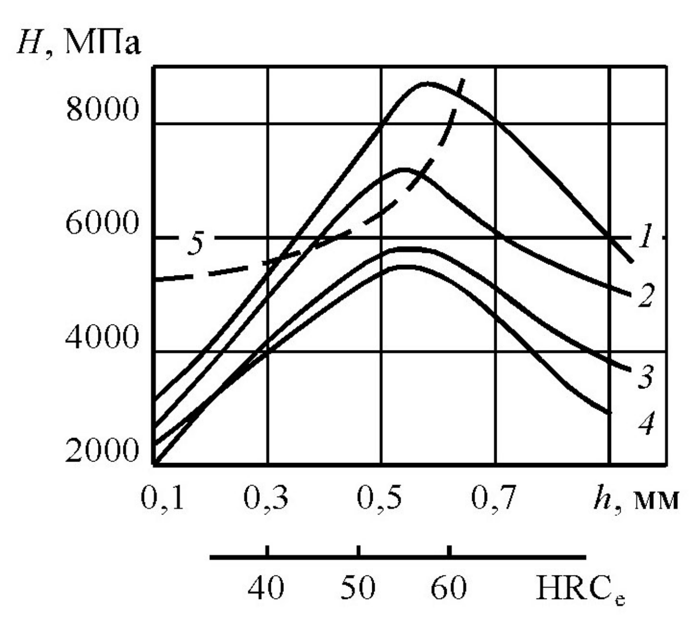


Рисунок 6.3 – Розподіл мікротвердості *H* за товщиною покриттів системи Ni-Cr-B-Si (1–4) та співвідношення мікротвердості й твердості порошкових покриттів (5):
1 – ПГ-10Н-01; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02; 4 – ПГ-АН9

Для розрахунків величини припуску на обробку різних напилених покриттів системи Ni-Cr-B-Si отримана така залежність [84]:

$$\left(0,54-2,45\cdot10^{-3}HRC\right)h\leq z\leq\left(0,54-2,16\cdot10^{-3}HRC\right)h, \qquad (6.6)$$

де h і HRC – відповідно товщина й твердість покриття.

6.5 Спадкування похибок технологічних баз

При обробці деталей зазвичай встановлювальні бази розглядають як геометрично правильні елементи, найчастіше плоскі, циліндричні або конічні поверхні. Детальний розгляд форми поверхонь установлювальних баз приводить до висновку про помилковість такого допущення у випадку обробки поверхонь високоточних деталей.

При оцінюванні спадкових явищ у зв’язку з базуванням заготовок на встановлювані поверхні необхідно знати їх топографію. Установка заготовки і її положення будуть визначатися тим, які три (рідше чотири) точки реальної поверхні контактують із відповідними точками встановлюваних елементів пристосувань [13, 72].

Одними з найпоширеніших є встановлювальні бази у вигляді центрових отворів. Установлено, що центрові отвори мають, як правило, на конічній

поверхні кілька виступів або хвиль, так що при обробці центр верстата контактує лише із цими виступами. Наслідком цього є перемінна жорсткість системи «заготовка–центр» за кутом повороту. В результаті похибки встановлювальних баз успадковуються-переносяться на оброблювану поверхню деталі. Величина відхилень форми залежить від кількості виступів центрового отвору й величини сили різання (рисунок 6.4).

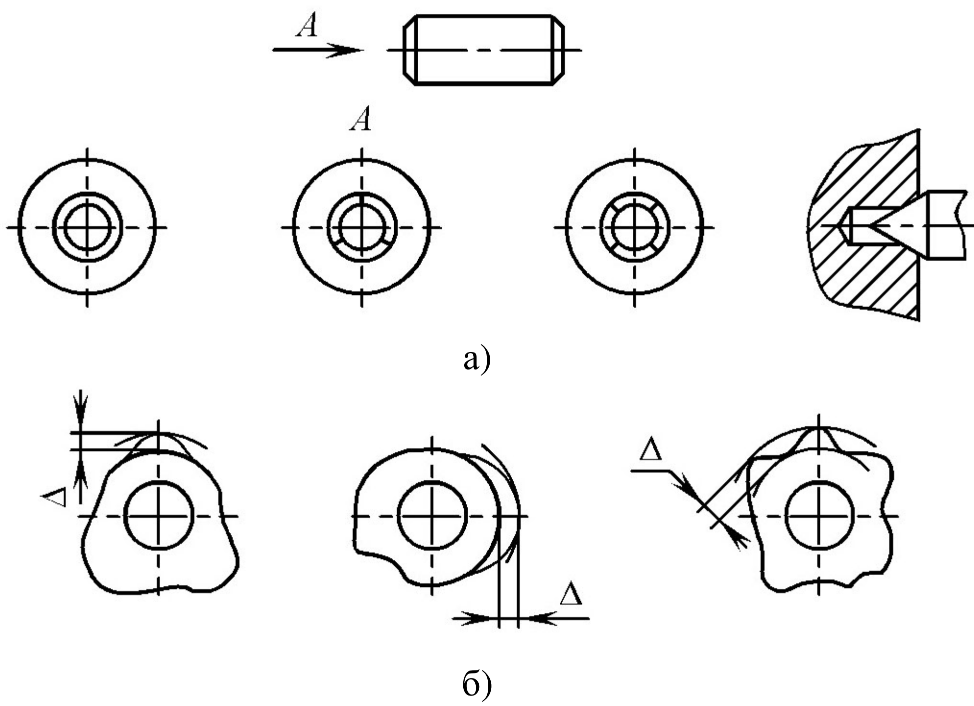


Рисунок 6.4 – Технологічне спадкування похибок центрових отворів:
а – заготовка і схеми центрових отворів з виступами; б – круглограми оброблених поверхонь, отриманих на базі центрових отворів з трьома, двома та п'ятьма виступами

Існує кілька причин виникнення виступів на центрових отворах. Крім утворення хвилястості внаслідок специфіки процесу різання слід зазначити ще низку причин. При центруванні коротких заготовок піддатливість шпиндельних вузлів металорізальних верстатів не залишається постійною за кутом повороту. Зміну піддатливості шпиндельних вузлів можна виразити залежністю, близькою до синусоїдальної. У випадку обертання заготовок великої довжини координати їх центру ваги можуть змінюватися. При цьому з'являється прецесія осі заготовки, що обертається, тобто круговий рух осі з одночасним обертанням заготовки навколо неї. Кутові швидкості цих рухів нерівні, що неминуче викликає викривлення форми поперечного перерізу центрового отвору [13].

Таким чином, при обробці заготовок правильна конічна поверхня центру контактує лише по окремих зонах зі складною поверхнею центрового отвору.

У загальному випадкові осі центрових отворів не збігаються. При цьому контакт між поверхнею центрового отвору й центру відбувається по двох точках, у результаті чого між центром і заготовкою утворюється зазор. Через

неспіввісність жорстких центрів верстата похибка взаємного положення центрових отворів і центрів може бути збільшена або зменшена. Тим самим може бути змінений зазор, що розглядається.

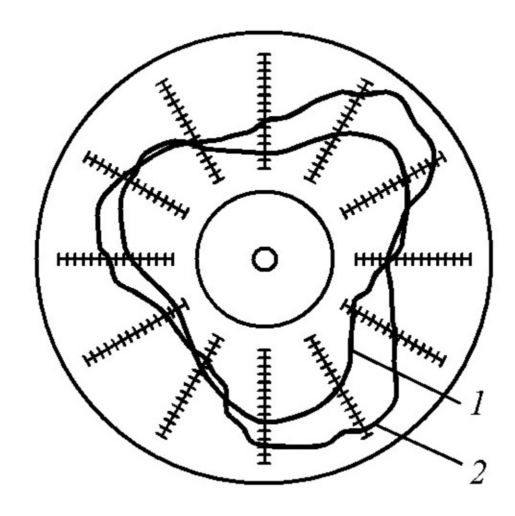


Рисунок 6.5 – Круглограми: 1 – форми центрового отвору; 2 – форми зовнішньої поверхні виробу в перетині центрового отвору після шліфування в центрах

Незбіжність осей і кутів центрового отвору й центру приводить до кромкових контактів та виникнення контактних деформацій під дією радіальної складової сили різання. Зазначені похибки у результаті успадковуються на оброблюваній поверхні (рисунок 6.5) [13].

6.6 Вплив затискних пристроїв на характер спадкування

Затискні пристрої здатні створювати відхилення форми на заготовках і деталях, які до закріплення таких відхилень не мали. Тому можна вважати, що в цих випадках затискні пристрої породжують похибки форми. Оскільки на заготовку діють сили закріплення, то її пружних переміщень не уникнути. Похибки, які породжуються цими переміщеннями, порівнюються з допусками на розміри високоточних деталей [12, 13, 72, 75].

Розрахунок похибок виконаний для обмеженого числа заготовок і деталей. Найбільшого поширення набули випадки розрахунків похибок кільцевих заготовок у трикулачкових патронах. Закріплення ж у цангових затискних пристроях і спеціальних патронах часто розглядається як позбавлене недоліків у зв’язку з нібито рівномірним розподілом затискної сили. Дійсна картина виникнення похибок від сил закріплення представлена на рисунку 6.6. Втулки однакових розмірів закріплені в різних затискних пристроях силами, необхідними для проведення однієї й тієї ж обробки – тонкого розточування. Відхилення форми в поперечних перерізах записані на круглограмі. При закріпленні в цангах на заготовках утворюються типові триграннi отвори (рисунок 6.6, а). Аналогічно при торцевому закріпленні в двох місцях на отворах утворюються дві типові западини (рисунок 6.6, б). Цього ефекту не

виникає при використанні дванадцятикулачкових патронів (рисунок 6.6, в). Закріплення за допомогою гофрованої втулки або затискного патрона (рисунок 6.6, г, д) практично не дає відхилень у поперечних перерізах, але приводить до істотних відхилень в осьовому перерізі. Якщо в зазначених затискних пристроях проводиться чистова обробка, то похибки, що виникли, вже не виправляються [13].

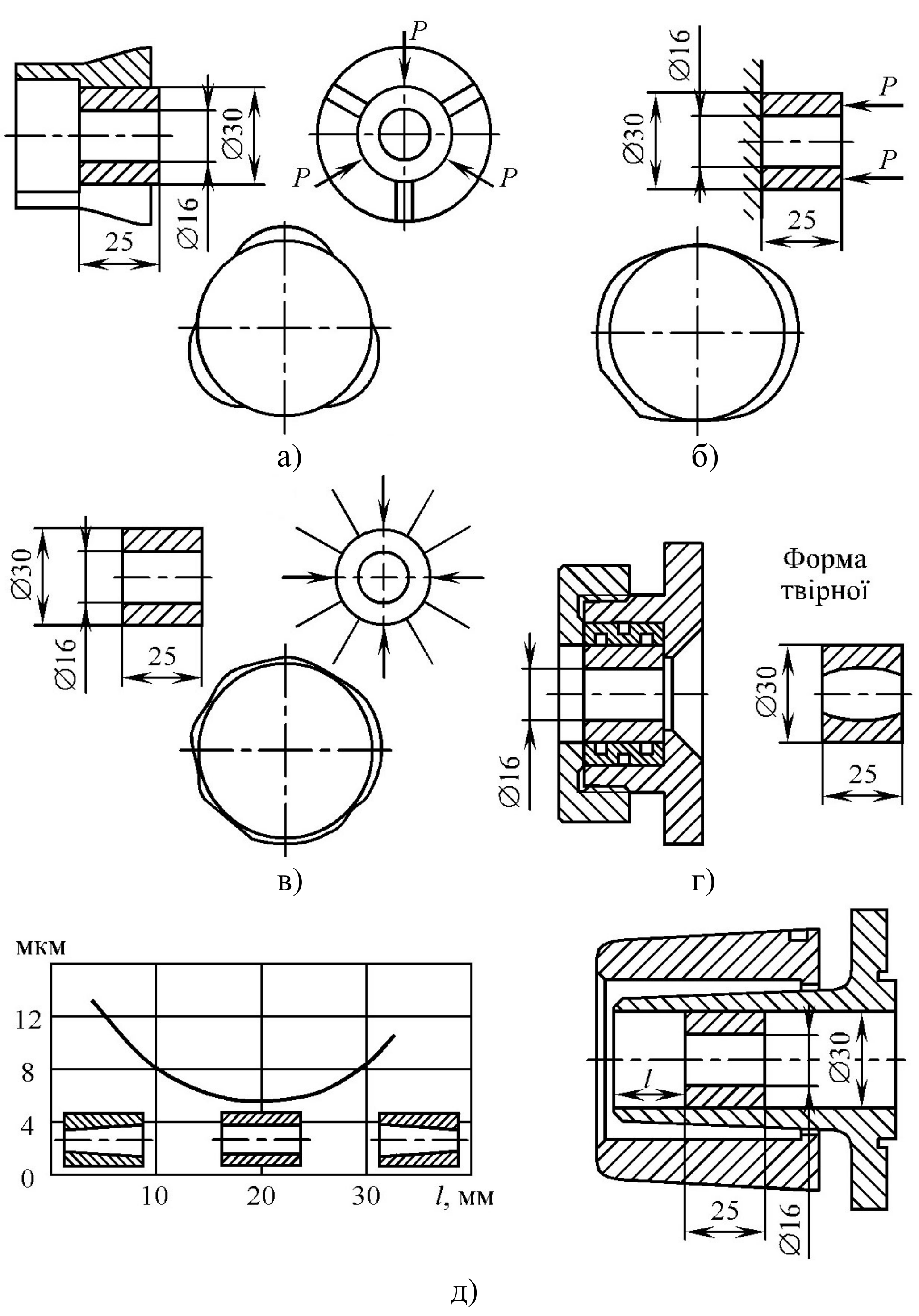


Рисунок 6.6 – Відхилення форми отворів, що спричиняються затискними пристроями різних конструкцій

У результаті встановлено, що конструкції затискних патронів, зокрема привід і форма затискних кулачків, досить суттєво впливають на некруглість оброблених поверхонь. Ретельний розгляд результатів закріплення деталей типу кілець показує, що при обертанні затискних пристроїв, наприклад патронів, некруглість оброблюваної поверхні змінюється за рахунок відтискань затискних елементів. Величина некруглості отворів кілець зменшується, тому що кожний кулачок намагається відійти від центру.

Складність визначення переміщень для багатьох типів деталей полягає не тільки у використанні громіздкого математичного апарату, але й у неможливості врахування реальних умов, у яких відбувається закріплення. Останні найчастіше зумовлені відхиленнями форми встановлювальних поверхонь.

Так, у спеціальному затискному патроні (рисунок 6.6, д) по черзі закріплювали заготовки (рисунок 6.7), встановлювальна поверхня яких мала похибки у вигляді овалу (*I*), тригранника (*II*) і чотиригранника (*III*). Величини похибок е коливалися в межах 10…50 мкм. Графіки показують перенос цих похибок на отвори заготовок, які розточувалися в патронах. Форма отворів, що являла собою правильну окружність, після розточування виявлялася овальною, трьох- або чотиригранною. Таким чином, навіть досконале затискне пристосування приводить до технологічного спадкування похибок зовнішньої встановлювальної поверхні та їх переносу на оброблювану поверхню.

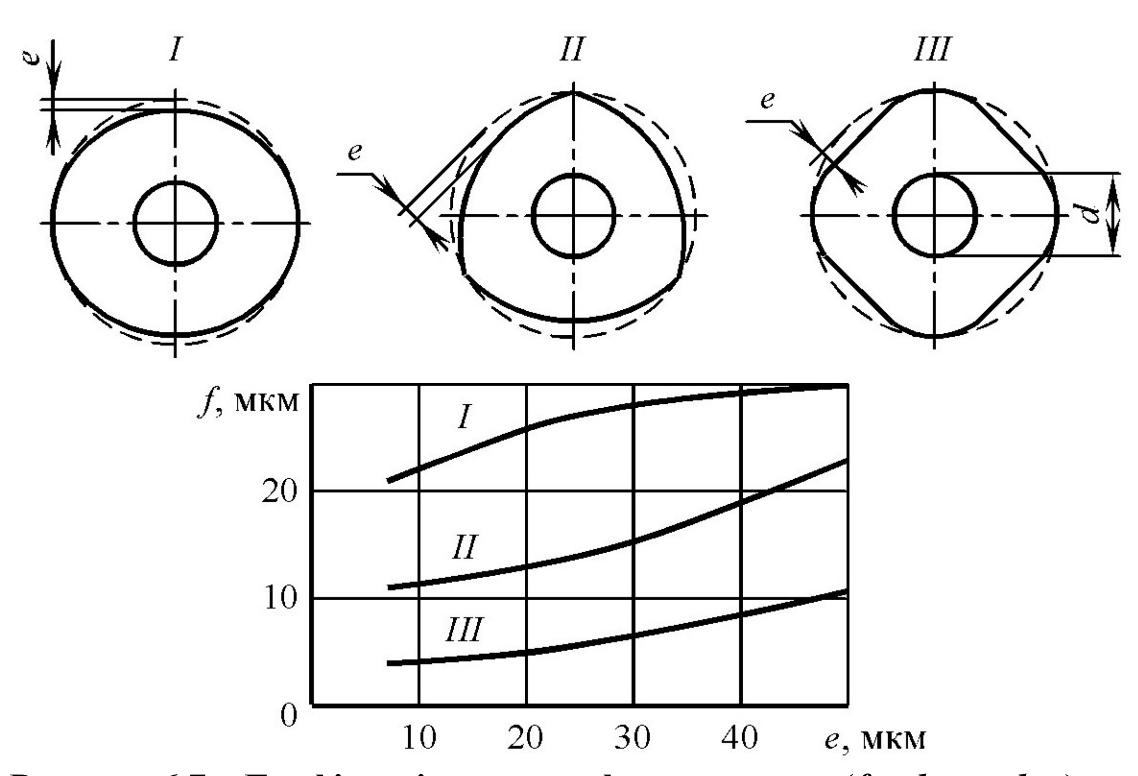


Рисунок 6.7 – Графіки відхилення форми отвору ($f = d_{max} - d_{min}$) при закріпленні втулок з різними відхиленнями форми зовнішньої встановлювальної поверхні

Практика обробки високоточних заготовок показує, що їх встановлювальні поверхні часто представляються циліндричними або конічними поверхнями, побудованими на базі кривих складних форм. У таких умовах математичний опис переносу похибок форми встановлювальної поверхні на оброблювану дуже складний. Тому найчастіше явища переносу оцінюють експериментально.

Затискні пристосування з навантаженням, розподіленим по встановлювальних поверхнях, звичайно створюють асиметричне навантаження. При знятті сил закріплення після обробки деформація заготовки зникає, що приводить до викривлення форми обробленої поверхні. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінювання величини деформації, викликаної силами закріплення. Можливе розв'язання зворотної задачі: визначення такої сили закріплення, яка викликала б припустиму деформацію. У результаті врахування впливу затискних пристроїв на характер технологічного спадкування дає змогу керувати технологічним процесом при виготовленні високоточних деталей.

6.7 Технологічне оснащення, яке забезпечує якість обробки

Методи поліпшення показників якості деталей передбачають урахування особливостей базування й закріплення заготовок, а також конструкцій пристосувань у зв'язку з явищем технологічної спадковості [13, 72].

Так, існує низка методів доведення центрових отворів, проте задовільні результати обробки можуть бути досягнуті при використанні високоякісних центрів. Якщо необхідно забезпечити некруглість оброблюваної поверхні порядку 0,5…1,0 мкм, слід застосовувати центри з некруглістю поперечного перерізу робочої частини порядку 1,5…2,0 мкм. Оптимальні умови контакту центру й центрового отвору виникають, якщо відхилення кута конуса центру від номіналу не більше ніж 20'. Кут конуса центрового отвору повинен бути більшим або дорівнювати куту конуса центру також не більше ніж на 20'. Ці умови забезпечуються ретельним обмірюванням центрів, а також добором відповідних центрувальних свердел.

При обробці заготовок з їх обертанням на призмах видом не-круглості базової поверхні, що найчастіше зустрічається, є овальність. Для овальної бази 90° – найбільш несприятливий кут призми. Добрі результати дає обробка на призмах високоточних деталей у спеціальному пристосуванні у вигляді базової втулки. У такого пристосування базова поверхня має повністю визначену похибку, вплив якої на оброблювану поверхню може бути врахований для всієї партії заготовок.

При обробці високоточних деталей у люнетах і розташуванні зони контакту заготовки та шліфувального круга вздовж горизонтальної лінії найменшу величину некруглості можна одержати шляхом добору відповідних кутів обхвату заготовки в опорах. Для забезпечення точності форми при шліфуванні на призмах або в люнеті необхідно передбачити регулювання кута обхвату заготовки.

Для закріплення кільцевих заготовок доцільно використовувати спеціальні патрони з прикладанням сил по торцю. Заготовка на чорновій обробці

встановлюється на три невеликі призми, до яких вона підтискається осьовою силою. Призми проникають у поверхню заготовки на деяку величину, що дозволяє передавати істотний крутний момент. Патрони, що працюють із призмами, можуть бути використані для токарських операцій, при шліфуванні ж крутний момент забезпечується силами тертя по торцю або шляхом використання торцевого магнітного патрона.

Раціональний метод закріплення високоточних кілець або гільз пов’язаний з використанням оправок із гофрованими втулками, які одночасно відіграють роль елементів, що центрують. Пристосування з гофрованими втулками створюють вісесиметричний характер навантаження заготовок, забезпечуючи по радіальному й торцевому биттях високий ступінь точності.

Основним недоліком більшості існуючих схем закріплення заготовок типу плит є відносно низька жорсткість системи «заготовка – пристосування – верстат». Це особливо характерно для початкових операцій, коли виникають похибки у вигляді неплощинності або непрямолінійності. В цьому випадку для збільшення жорсткості технологічної системи доцільно використовувати опори, які підводяться.

У всіх випадках використання технологічного оснащення необхідно враховувати явища технологічної спадковості та мати на увазі, що шкідливі спадкові явища породжуються найчастіше при базуванні й закріпленні заготовок.

6.8 Експлуатаційна спадковість деталі та методи керування

Схема ефектів післядії при нормальному зношуванні в умовах граничного змащення базується на таких положеннях [17, 21, 85]:

1. У процесі тертя в активних поверхневих шарах матеріалу деталі формується структура, яка впливає на її зносостійкість, тому здатність металу опиратися зношуванню розглядається як «структурно-чутлива характеристика». Під словом «структура» мається на увазі фазовий склад гомогенної та гетерогенної систем, макро- і мікроструктури, характер формування й розподілу дефектів кристалічної ґратки.

2. Активний об’єм металу можна розділити по глибині на три шари: перший – порядку десятків нанометрів, у якому відбуваються інтенсивна пластична деформація, активація й утворення плівок вторинних структур; другий – до декількох десятків мікрометрів, у якому поширюються пружнопластичні деформації й у зоні з досить високим ступенем пластичної деформації формується коміркувата структура, причому зі збільшенням відстані від поверхні тертя розмір комірок зростає, що викликано зменшенням ступеня деформації по глибині шару; третій – порядку сотень мікрометрів, у якому наявний хвильовий процес пружного деформування матеріалу. Знос поверхні тертя при змінному навантаженні є результатом пластичного деформування тонких поверхневих шарів (мікро-різання або малоциклова втома при «пластичному контакті») та руйнування плівок вторинних структур і

найближчого поверхневого шару за рахунок розвитку мікротріщин при багаторазовому навантаженні (багатоциклова втома при «пружному контакті»).

3. У зв’язку зі стохастичним характером мікрогеометрії поверхонь, що труться, і фізико-механічних властивостей локальних мікрооб’ємів матеріалу в будь-який момент часу на цій ділянці поверхні тертя можуть існувати різні види фрикційної взаємодії (пружне або пластичне відтискання матеріалу, утворення або руйнування плівок вторинних структур), тобто одночасно на поверхні тертя мають місце різні стадії процесу зношування. Для конкретного сполучення кожному рівню навантажувального впливу (навантаження, швидкість, кліматичні фактори: температура, атмосферний тиск, вологість) відповідає певне співвідношення різних видів фрикційних зв’язків.

4. Кожній комбінації питомого тиску й відносної швидкості переміщення відповідає певний структурний стан, що характеризується, зокрема, для другого шару рівнем перекрученості кристалічної ґратки, середнім розміром комірки у напрямку тертя й глибиною коміркуватої фрагментації. Досягнення структурного стану, що визначається конкретними режимами тертя, зумовлене пластичним деформуванням поверхневого шару металу до того ступеня, котрий відповідає величині прикладених навантажень у зоні контакту, якщо виникаючі в поверхневому шарі напруження перевищують границю текучості металу у вихідному стані, тобто $\sigma_\varepsilon > c_k\sigma_m$ [86]. Тут c_k – коефіцієнт, що залежить від умов контактування; σ_m – границя текучості матеріалу; σ_ε – напруження, що виникає при дії навантаження: $\sigma_\varepsilon = k_p \cdot f \cdot p_r$ (k_p – коефіцієнт, що характеризує напружений стан матеріалу; f – коефіцієнт тертя ковзання; p_r – середній тиск на одиничному контакті).

Границя текучості металів з ОЦК-ґраткою визначається за формулою Холла-Петча [87]:

$$\sigma_m = \sigma_0^{/} + k_d \cdot d^{-0,5}, \qquad (6.7)$$

де $\sigma_0^{/}$ – величина внутрішнього тертя при русі дислокацій; k_d – коефіцієнт, зумовлений бар’єрним ефектом границь; d – розмір зерна (комірки).

Найбільш імовірний такий механізм зношування металів. Якщо величина напружень на локальній ділянці поверхні тертя не перевищує границі текучості матеріалу: $\sigma_\varepsilon < c_k\sigma_{sv}$, руйнування цієї ділянки відбувається в результаті багатоциклової втоми. У випадку, коли $\sigma_\varepsilon > c_k\sigma_{sv}$, поверхневий шар металу пластично деформується, причому залежно від відношення h_r/R' (h_r – глибина впровадження мікронерівності, R' – радіус мікронерівності, що впровадилася) можуть бути реалізовані різні види фрикційної взаємодії (відтискання матеріалу, проорювання) і руйнування є наслідком багатоциклової втоми або мікрорізання [64, 65]. У результаті пластичного деформування й активаційних процесів у найтоншому поверхневому шарі утворюються вторинні структури, а в другому шарі формується коміркувата структура, що зумовлює більш високі у порівнянні з вихідними фізико-механічні властивості.

З моменту, коли встановлюється відповідність між величиною напружень при терті та структурою, що сформувалася, подальшої пластичної деформації не відбувається. При цьому виконання умови [64]

$$\frac{h_r}{R^{/}} \le 200\left(\frac{\sigma_s}{E}\right)^2, \qquad (6.8)$$

де E – модуль пружності матеріалу, яке визначає існування механізму руйнування в результаті багатоциклової утоми, спричинене збільшенням границі текучості деформованого шару матеріалу σ_s і пов'язаним із субструктурним зміцненням поверхні зменшенням глибини впровадження h_r.

Після втомного руйнування поверхневого шару на локальних ділянках розташовані під ним активні об'єми матеріалу вступають у безпосередню взаємодію з деталлю, яка сполучається, і зазнають пластичної деформації, результатом котрої є подрібнювання коміркуватої структури та утворення плівок вторинних структур. Таким чином, процес повторюється й забезпечується пристосування структури матеріалу до навантажень, що діють на поверхні. Якщо здатність матеріалу до субструктурного зміцнення вже вичерпана, при збільшенні навантаження можуть виникнути такі види руйнування, як схоплювання поверхневих плівок і глибинне виривання, коли утворюються мостики зварювання, за міцністю, які не уступають матеріалу деталей, що труться.

На уявленнях про трансформацію структури поверхневих шарів металів при терті ґрунтується пояснення існування перехідних періодів у процесі зношування при зміні навантаження. Поверхня тертя умовно розділяється на зони, в одній з яких відбувається тільки пластичне деформування активних мікрооб'ємів матеріалу, в іншій – пружне деформування, а в третій – руйнування поверхневих шарів. При ступінчастому збільшенні зовнішнього навантаження порушується динамічна рівновага процесів руйнування поверхонь і формування структури активних об'ємів матеріалу, оскільки нерівність $\sigma_\varepsilon > c_k\sigma_s$ стає справедливою і для зони, що мала тільки пружні деформації. Площа плівок вторинних структур значно зменшується, збільшується зона пластичного деформування, що приводить до різкого підвищення інтенсивності зношування. У процесі пластичного деформування відбувається трансформація структури поверхневих шарів металу, що приводить до збільшення σ_s. Тому через певний проміжок часу стає справедливою нерівність $\sigma_\varepsilon < c_k\sigma_s$, виникає новий рівноважний стан й інтенсивність зношування приймає значення, яке відповідає новому навантаженню.

При ступінчастому зменшенні навантаження нерівність $\sigma_\varepsilon < c_k\sigma_s$ буде мати місце для зон тертя, у яких поверхневі шари були піддані пластичному деформуванню. У цих зонах буде відбуватися пружне деформування, й інтенсивність зношування зменшиться. Проте руйнування деформованих при попередньому навантаженні шарів матеріалу відбудеться за меншої кількості

циклів навантаження, ніж заново утворених потім ділянок фактичного контакту. В цьому проявляється деяка «інерційність» процесу зношування при переході від більшого навантаження до меншого. Зміна у часі інтенсивності зношування поверхні, що треться, при ступінчастому навантаженні відбувається згідно з уявленнями про структурну пристосовуваність металів при терті [17, 65].

Підвищення довговічності машин пов'язане з усуненням негативних факторів експлуатаційної спадковості або зменшенням їх впливу на якість функціонування вузлів тертя та механізмів.

Виходячи з аналізу процесів утрати працездатності вузлів тертя машин, можна сформулювати такі ***принципи керування експлуатаційною спадковістю*** [17, 21]:

- забезпечення беззношуваності або високої зносостійкості деталей;
- забезпечення рівномірного розподілу зносу по поверхнях тертя;
- забезпечення незалежності визначальних параметрів вузла тертя від зносу деталей.

Традиційні методи підвищення зносостійкості деталей можна умовно розділити на дві групи: методи, основані на підвищенні твердості робочих поверхонь (термообробка, різні дифузійні та інші хіміко-термічні методи обробки, пластичне деформування, електролітичне, іонно-плазмове нанесення покриттів й ін.), і методи, що забезпечують оптимальну мікрогеометрію деталей та умови змащення. Умовність такого поділу пов'язана з тим, що методи, які можуть бути віднесені до першої групи, наприклад, методи поверхневого пластичного деформування, дозволяють не тільки зміцнювати поверхневий шар, але й створювати певну мікрогеометрію обробленої поверхні (віброобкатування, алмазне вигладжування тощо).

Вивчення технологічної спадковості дає можливість обґрунтувати технологічні способи підвищення довговічності деталей, що труться, шляхом вибору оптимальних поєднань методів і режимів їх обробки [12, 13, 17, 21].

В останні роки проводяться роботи зі створення беззношуваних сполучень, що труться, на основі явища вибіркового переносу [88, 89]. Беззношуваність у низці випадків забезпечується також за рахунок виключення безпосереднього контакту поверхонь, що труться, шляхом створення умов рідинного або газового змащення, «підвішування» деталей в електромагнітному полі.

Підвищення зносостійкості досягається при виборі матеріалів деталей, що сполучаються, з урахуванням їх сумісності. В цьому випадку деталі вузла тертя розглядають вже не ізольовано, а як елементи певної системи.

Урахування спадковості при конструюванні полягає як у знаходженні рішень, що сприяють мінімізації зносу (ефективні ущільнення, розвантажувальні пристрої та ін.), [90, 91, 92], так і в забезпеченні рівномірності його розподілу по поверхні тертя за рахунок уведення різних елементів – компенсаторів, спеціальних вставок з підвищеною зносостійкістю та ін. Для зменшення впливу нерівномірності розподілу зносу на вихідні параметри вузлів тертя для деяких виробів можливе навмисне викривлення

форми робочих поверхонь деталей, виходячи з передбачуваної епюри зносу [93].

Заходи щодо підвищення довговічності машин на основі використання принципу незалежності визначальних параметрів від зносу деталей базуються на автоматизації процесів підналагодження вузлів і механізмів для відновлення взаємного положення деталей, що зношуються, регулювання зазорів або натягів у сполученнях та ін. (рисунок 6.8).

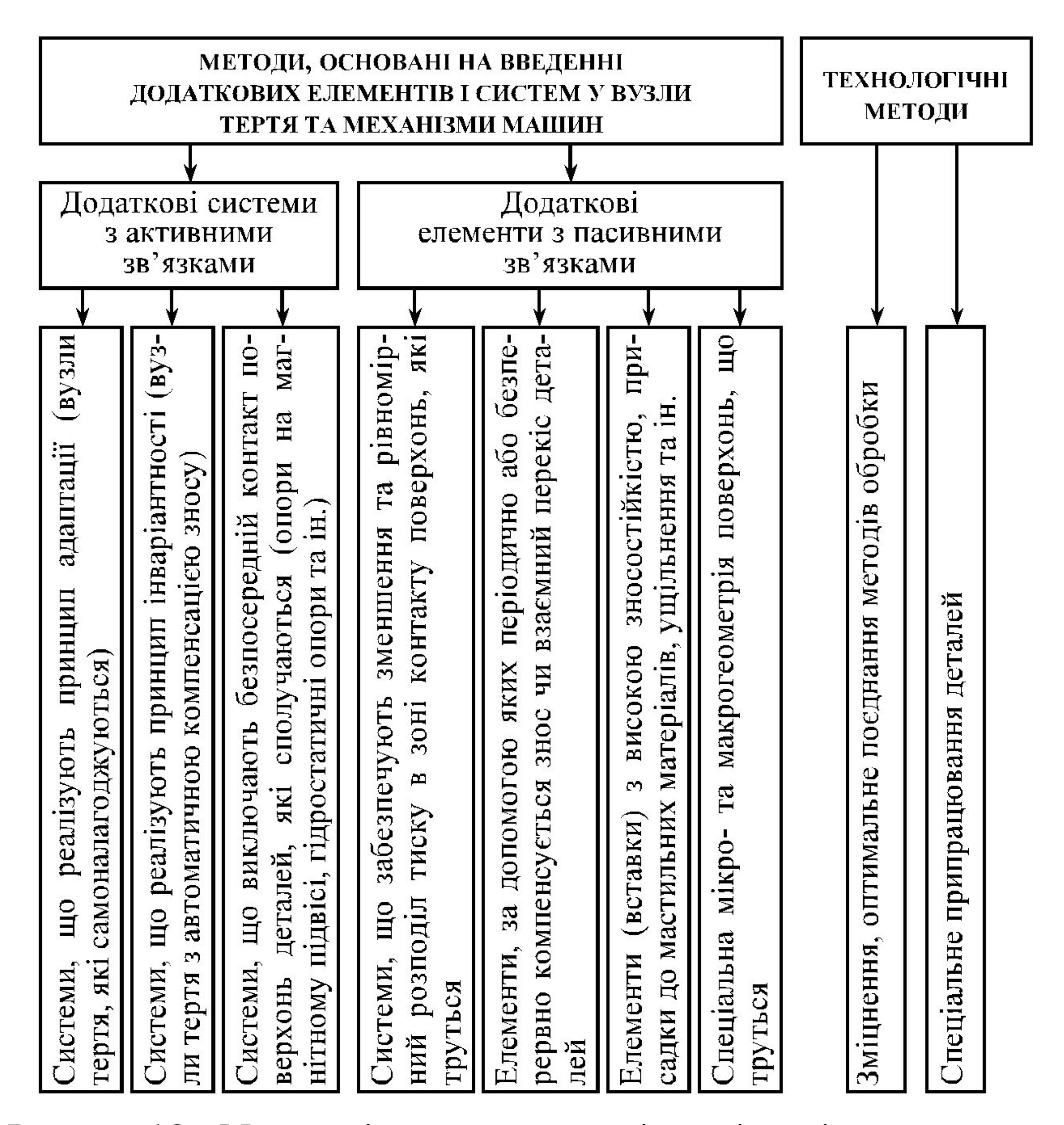


Рисунок 6.8 – Методи підвищення довговічності вузлів тертя машин, що враховують їх експлуатаційну спадковість

Методи підвищення довговічності вузлів тертя, що дають можливість усувати або зменшувати негативні прояви експлуатаційної спадковості [17].

6.9 Технологічне спадкування експлуатаційних властивостей

Етапи технологічного процесу виготовлення виробів супроводжуються взаємодіями різних технологічних об'єктів.

Технологічний об'єкт (ТО) – будь-який з об'єктів, у результаті взаємодії яких відбувається визначення або зміни стану предмета виробництва при виготовленні виробу. Безліч ТО, взаємодіючих у процесі виготовлення виробу, утворюють технологічні системи. Розрізняють технологічні системи рівнів операції, процесу, виробничого підрозділу, підприємства.

Технологічне середовище – сукупність ТО, що взаємодіють з виділеним ТО на окремому етапі виготовлення виробу. Виділеним ТО можуть бути: предмет виробництва (заготовка, складальна одиниця); окрема технологічна операція; процес і т. д. Середовищем є все, що не належить виділеному ТО, але із чим у виділеного ТО є зв'язок. Якщо в технологічній системі рівня операції механічної обробки виділяють ТО – заготовку, технологічне середовище рівня операції відносно неї утворюють інструмент та пристосування (рисунок 6.9).

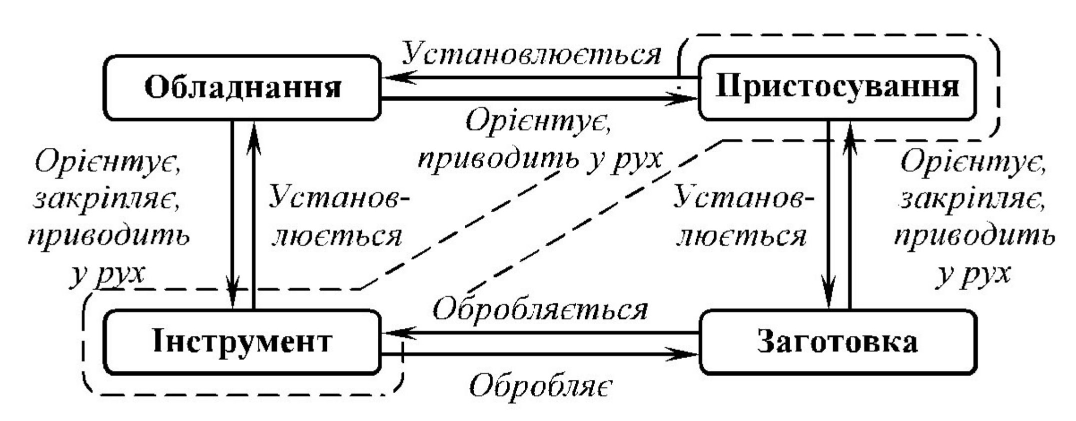


Рисунок 6.9 – Структура технологічної системи та утворення середовища рівня операції механічної обробки

Обладнання тут не входить до складу середовища безпосередньо, але, приводячи в рух пристосування й інструмент, опосередковано бере участь у формуванні середовища. Технологічне середовище може бути внутрісистемним або зовнішнім (відповідним до іншого рівня ієрархії). Рівні розгляду середовищ відповідають рівням уявлення технологічних систем. Визначено основні види технологічних середовищ рівнів операцій для різних переділів машинобудівного виробництва.

Технологічні середовища віртуальні, ієрархічні й багатозв'язні як за сукупним впливом на показники якості предмета виробництва, так і за характером взаємодій у процесі формування властивостей виробів. Багатозв'язність припускає розгляд процесу формування кожного із сукупності властивостей предмета виробництва як результату одночасних та попередніх його взаємодій із середовищами різних рівнів, що впливають на виділену властивість. Взаємодія не розглядається суперпозиційно. Властивості виробу визначаються властивостями вихідних заготовок і формуючим технологічним

середовищем наскрізного процесу його виготовлення. Формування властивостей виробу може розглядатися як сукупність процесів їх спрямованої зміни та збереження.

Властивості, що формуються у ході технологічного процесу виготовлення (показники якості), можна розділити на: змінювані й квазістабільні властивості.

Змінювані властивості можуть трансформуватися залежно від етапу процесу виготовлення. Квазістабільні властивості, що проявилися на певному етапі виготовлення виробу, входять до складу безлічі його вихідних властивостей. Процес виготовлення не передбачає прямого технологічного впливу на квазістабільні властивості, але вони можуть змінитися в результаті технологічних і пов’язаних з ними впливів, спрямованих на зміну інших властивостей.

Будь-яка властивість виробу (X_i) після виконання j операції наскрізного технологічного процесу виготовлення виробу [94, 95]

$$X_{ij} = \frac{X_{i(j-1)}}{k_{i(j-1)j}} + \frac{X_{m(j-1)}}{k_{i(j-1)jm}}, \tag{6.9}$$

де $X_{i(j-1)}$ – значення властивостей X_i, досягнуте на попередній операції (j – 1); $k_{\mathrm{i}(j-1)}$ – коефіцієнт технологічного спадкування для i-ої властивості при виконанні операції j після операції (j – 1); $X_{m(j-1)}$ – значення властивості X_m, набутої виробом до виконання операції j, що впливає на властивість X_i в операції j; $k_{i(j-1)jm}$ – коефіцієнт спадкування властивості m, набутої виробом до операції j властивістю i.

Для визначення значень властивостей у першому випадкові використовується апарат каскадних графів (див. рисунок 2.5). Однак при зміні знака коефіцієнта в нульовій точці $k_{i(j-1)j}$ = 0 значення властивості X_i стає невизначеним, тому що відбувається розрив опису.

У другому випадкові для опису процесів трансформації властивостей виробів використовують експонентні моделі

$$X_i = aX_{i-1}^b, \tag{6.10}$$

де X_{i-1}, X_{i} – значення властивості на попередній і виконуваній операції відповідно; a, b – коефіцієнти технологічного спадкування.

Однак ці описи показують, що розглянуті підходи мають загальні недоліки. По-перше, неможливо змінити знак властивості (що важливо, наприклад, при прогнозуванні залишкових напружень). По-друге, якщо в ході технологічного процесу значення властивості стає рівним нулю, надалі «відновлення» ненульового значення властивості неможливо.

Аналіз характеру зміни властивостей виробу показує, що найбільш доцільна лінійна форма представлення зміни властивостей

$$X_{ij} = X_{i(j-1)}\left(1+k\right), \qquad (6.11)$$

де X_{ij}, $X_{i(j-1)}$ – значення властивості X_i після операцій j і (j – 1) відповідно; k – коефіцієнт технологічного спадкування для виділеної властивості.

Математичний апарат базується на таких основних положеннях:

• якість деталі формується протягом усієї її технологічної передісторії. Безліч показників якості деталі є результатом технологічної передісторії;

• будь-який технологічний і пов’язаний з ним вплив на заготовку змінює всі показники якості заготовки;

• будь-який показник якості, змінюючись, змінює всі інші показники якості заготовки.

Перше з розглянутих положень очевидно. Кожна з безлічі властивостей деталі зароджується на певному етапі загального технологічного процесу її виготовлення. Так фізико-механічні властивості матеріалу деталі формуються на етапі виготовлення вихідних матеріалів; геометричні характеристики деталі починають формуватися на етапі виготовлення заготовки. Первинно сформовані властивості надалі зберігаються або трансформуються. Інтенсивність формування тієї або іншої властивості на кожному з етапів може бути різною, однак загальний процес формування властивостей перманентний. Послідовність етапів, склад і послідовність використовуваних технологічних методів визначають технологічну передісторію деталі, підсумок якої – безліч її властивостей.

Будь-який технологічний вплив на предмет виробництва є комплексним. Для застосування, наприклад, на етапі виготовлення деталі будь-якого методу механічної обробки заготовка встановлюється в певному положенні щодо виконавчих органів обладнання й закріплюється. При цьому в заготовці виникають поля внутрішніх напружень, змінюються характеристики фізико-механічних властивостей, заготовка деформується, тим самим змінюються її геометричні характеристики тощо. При реалізації методу проходять процеси силової, теплової, хімічної й іншої взаємодій інструмента із заготовкою, що безпосередньо впливають на стан безлічі її властивостей.

Заготовка являє собою збалансовану систему, внаслідок чого її властивості, що відбивають різні сторони цієї системи, перебувають у взаємозв’язку. Зміна будь-якої властивості неминуче приведе до зміни безлічі пов’язаних з ним властивостей. Процес має ланцюговий характер і охоплює всю безліч властивостей. Величини зазначених змін визначаються характером та зв’язками взаємодіючих властивостей. Деякі із взаємозв’язків властивостей очевидні й досить досліджені, інші – не настільки очевидні й вимагають додаткових досліджень. Взаємодія і взаємовплив властивостей існують об’єктивно, однак значимість величин, що їх характеризують, визначається рівнем технічних вимог, які висуваються до деталі.

Положення про взаємодію і взаємовплив властивостей виробу дозволяє зняти одне з найбільш жорстких і недостатньо обґрунтованих допущень, що використовуються в технології машинобудування при описі процесів

формування властивостей: кожна із властивостей виробів формується незалежно від інших (суперпозиція властивостей).

Ці положення досить коректні, оскільки вони не зводять описи змін властивостей виробу до опису окремого випадку, а, навпаки, є узагальнюючими.

Безліч значень показників якості виробу після виконання операцій його виготовлення з урахуванням закономірностей технологічного спадкування й базової моделі визначають з виразу (у детермінованому поданні)

$$\left[K\right]_j = \left[K\right]_{j-1} + \left[\Delta K\right]_m + \left[\Delta K\right]_y + \left[\Delta K\right]_p, \tag{6.12}$$

де $\left[K\right]_{j-1}$ – безліч значень показників якості, що характеризують стан виробу після виконання попередньої операції; $\left[\Delta K\right]_m$ – безліч змін значень показників якості виробу внаслідок прямого впливу технологічних методів операції; $\left[\Delta K\right]_y$ – безліч змін значень показників якості виробу внаслідок впливу умов реалізації технологічних методів j операції; $\left[\Delta K\right]_p$ – безліч змін значень показників якості виробу, пов'язаних з передісторією.

$$\left[\Delta K\right]_m = \begin{bmatrix} k_1 & & 0 \\ & k_2 & \\ & \ldots & \\ 0 & & k_n \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \ldots \\ K_n \end{bmatrix}_{j-1}, \tag{6.13}$$

де $K_1, ..., K_n$ – значення показників якості виробу, набуті після операції (j – 1); k_1, …, k_n – коефіцієнти зміни показників якості виробу при використанні j-го технологічного методу.

$$\left[\Delta K\right]_y = \begin{bmatrix} u_1 & & 0 \\ & u_2 & \\ & \ldots & \\ 0 & & u_n \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \ldots \\ K_n \end{bmatrix}_{j-1}, \tag{6.14}$$

де $u_1, ..., u_n$ – коефіцієнти зміни показників якості виробу, пов'язаних з умовами реалізації j-го технологічного методу.

$$\left[\Delta K\right]_m = \begin{bmatrix} 0 & k_{12} & ... & k_{1n} \\ k_{21} & 0 & ... & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & 0 & k_{3n} \\ ... & ... & ... & ... \\ k_{n1} & k_{n2} & ... & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ ... \\ K_n \end{bmatrix}_{j-1}, \qquad (6.15)$$

де k_{il} $\left(i, l = 1, ..., n; i = 1\right)$ – коефіцієнти, що характеризують зміни показника якості i залежно від показника якості l; $\left[K_1, K_2, ..., K_n\right]_{j-m}^{m}$ – значення показників якості виробу, сформованих до виконання операції j, але впливаючі на показники якості, що формуються в операції j.

Коефіцієнти k_i, u_i, k_{il} характеризують різні сторони технологічного спадкування: k_i, u_i, – механізм поточного, оперативного технологічного спадкування, k_{il} – вплив технологічної спадковості на формування властивостей виробу.

$$k_i = f_i^k\left(P_{1j}^T, P_{2j}^T, ..., P_{kj}^T\right),, \qquad (6.16)$$

де $P_{1j}^T, P_{2j}^T, ..., P_{kj}^T$ – параметри j-го методу, що характеризують технологічний вплив (режим механічної обробки, температура нагрівання і т. д.).

$$u_i = f_i^u\left(P_{1j}^u, P_{2j}^u, ..., P_{kj}^u\right),, \qquad (6.17)$$

де $P_{1j}^u, P_{2j}^u, ..., P_{kj}^u$ – параметри, що характеризують умови реалізації j-го технологічного методу (вплив похибки встановлення, налаштування, стабільності температурного режиму тощо). Вплив коефіцієнтів k_i і u_i може бути враховано й у сепарабельній формі

$$\left[K_i\right] = \left[m_i\right]_j \left[K_i\right]_{j-1} + \left[u_i\right]_j \left[K_i\right]_{j-1} + \left[k_{ij}\right]\left[K_i\right]_{jm}, \qquad (6.18)$$

або

$$\left[K_i\right]_j = \left[S_i\right]_j \left[K_i\right]_{j-1} + \left[k_{ij}\right]\left[K_i\right]_{jm}, \qquad (6.19)$$

де $\left[m_i\right]_j$ – матриця значень коефіцієнтів оперативної зміни і показника якості при використанні j технологічного методу; $\left[S_i\right]_j$ – матриця значень коефіцієнтів зміни i показника якості при взаємодії предмета виробництва із середовищем рівня операції, що реалізує j технологічний метод. Для середовищ, що реалізують методи механічної обробки, $S_i \leq 1$, для методів термічної обробки

S_i > 1. Елементи матриць $\left[S_i\right]_j$, $\left[k_{ij}\right]$ є основними характеристиками трансформації показників якості предмета виробництва при взаємодії з технологічними середовищами відповідного рівня. Їх значення залежать від стану утворюючих середовище об’єктів.

На основі математичного апарату розроблена методика забезпечення значень показників якості виробу, що формуються в процесі виготовлення [94, 95], яка включає:

• визначення безлічі вихідних значень показників якості заготовки (з урахуванням етапу зародження відповідних властивостей);

• визначення безлічі показників якості, що формуються;

• визначення необхідного інформаційного забезпечення залежно від складу технологічних методів і відомої структури технологічного процесу;

• генерацію автономного каскадного графа для кожного показника якості з виділеної безлічі, яка здійснюється на основі загальної структури технологічного процесу;

• розрахунки значень показників якості за каскадними графами з повним урахуванням технологічної спадковості при декомпозиції графа на лінійні й нелінійні фрагменти і використанні відповідних залежностей.

6.10 Спрямоване формування показників якості

Математичний апарат універсальний і може бути використаний при описі змін властивостей виробу в результаті взаємодії предмета виробництва з технологічними середовищами різних рівнів. Значення характеристик технологічних середовищ і закономірностей їх зміни дозволило сформувати основне завдання направленого формування показників якості виробу: при відомих початкових та кінцевих властивостях предмета виробництва визначити найбільш оптимальне з погляду трансформації властивостей технологічне середовище. У результаті запропонований загальнометодичний підхід до забезпечення спрямованого формування оптимальних властивостей виробів (рисунок 6.10).

Найважливішою особливістю підходу є формування для кожного технологічного переділу наскрізного процесу виготовлення виробу оптимального технологічного середовища, що забезпечує найбільш раціональний розподіл значень показників якості за переділами і надає процесу формування якості виробу необхідну спрямованість. Змінюючи середовище або його характеристики, можна керувати формованими властивостями виробів. На основі порівняння характеристик середовищ базового технологічного процесу та бажаних можуть бути визначені необхідні коригувальні впливи за зміною складу, структури й умов взаємодії, як елементів технологічних середовищ, так і останніх із предметом виробництва.

На базі концептуального підходу розроблено методичне забезпечення, що дозволяє визначати коефіцієнти:

• оперативної зміни i-го показника якості при використанні j-го технологічного методу – $(m_i)_j$;

• зміни i-го показника якості виробу, пов'язаного з умовами реалізації j-го технологічного методу – $(u_i)_j$;

• зміни i-го показника якості при взаємодії із середовищем рівня операції, що реалізує j-ий технологічний метод — $(S_i)_j$.

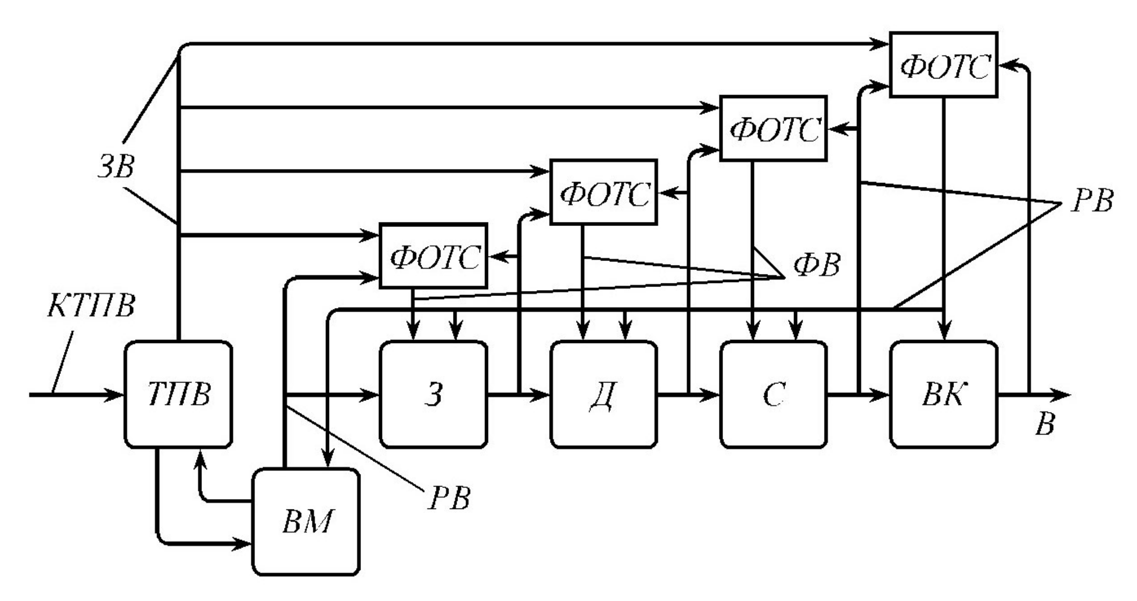


Рисунок 6.10 – Концептуальна схема спрямованого формування оптимальних властивостей виробів:

В – виріб; *ЗВ, РВ, ФВ* – задані властивості, реальні властивості та властивості виробу, що формуються; *ТПВ* – технологічна підготовка виробництва; *ВМ* – виготовлення вихідних матеріалів; *З* – виготовлення заготовок; *Д* – виготовлення деталей; *С* – складання; *ВК* – випробування і контроль; *КТПВ* – конструктивно-технологічні параметри виробу; *ФОТС* – формування оптимальних технологічних середовищ

Оперативно формуюча складова $\left(K_i\right)_j^{on}$ значення показника K_i:

$$\left(K_i\right)_j^{on} = \left(m_i\right)_j \left(K_i\right)_{j-1} + \left(u_i\right)_j \left(K_i\right)_{j-1}. \qquad (6.20)$$

Якщо метод не реалізований, $\left(m_i\right)_j = 1$, $\left(u_i\right)_j = 0$, інакше $0 < \left(m_i\right)_j \le 1$. Зміна знака та значення показника якості відбувається в результаті сукупної зміни коефіцієнтів $\left(m_i\right)_j$ і $\left(u_i\right)_j$. Для кожного технологічного методу знайдено штатні умови реалізації, що визначають значення $\left(m_i\right)_j$. Коефіцієнт $\left(m_i\right)_j$ ураховує штатні умови реалізації методу (зокрема штатні економічні умови обробки), а $\left(u_i\right)_j$ – відмінні від штатних, а також інші умови, що додатково

характеризують середовище (базування й закріплення заготовки, пружні характеристики елементів технологічної системи і т. д.).

Аналітичне визначення коефіцієнтів $(m_i)_j$, $(u_i)_j$, $(S_i)_j$ неможливе, тому вони визначаються статистичною обробкою експериментального матеріалу. Для конкретного методу доданок $(u_i)_j (K_i)_{j-1}$ виділяється в систематичну складову (C):

$$(K_i)_j^{on} = (m_i)_j \left[(K_i)_{j-1} \right]_r + C. \tag{6.21}$$

де r – індекс реалізації методу.

При визначенні значень $(m_i)_j$ використовують методики: максимального перетинання множини вхідних і вихідних значень показників якості; усереднення границь діапазонів (рисунок 6.11). При відомих $(m_i)_j$ значення $(u_i)_j$ визначають відповідно до

$$\left[(u_i)_j \right]_r = \left[(K_i)_j^{on} \right]_r / \left[(K_i)_{j-1}^{on} \right]_r - (m_i)_j . \tag{6.22}$$

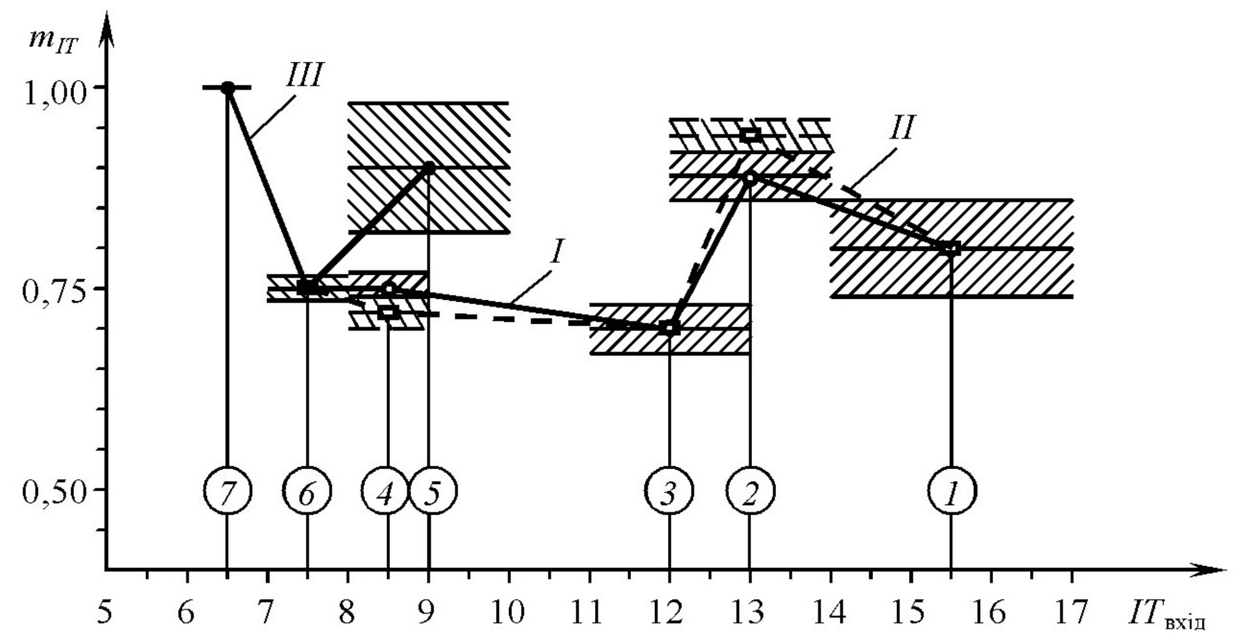


Рисунок 6.11 – Порівняння коефіцієнтів оперативної зміни точності розміру (m_{IT}) для методів обробки зовнішніх циліндричних поверхонь: 1, 2, 3, 4 – точіння чорнове, напівчистове, чистове, тонке; 5, 6, 7 – шліфування попереднє, остаточне, тонке; I, III – методика максимального перетину множин; II – методика усереднення границь

При відомих $(m_i)_j$ та $(u_i)_j$

$$(S_i)_j = (K_i)_j^{on} / (K_i)_{j-1}^{on} \qquad (6.23)$$

використовують таблиці усереднених значень коефіцієнтів оперативної зміни властивостей $(m_i)_j$ для основних технологічних методів обробки зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь, а також площин.

Установлено, що оптимальна похибка визначення коефіцієнтів оперативної зміни показників якості оброблюваних заготовок для методів абразивної обробки у середньому в 3 рази вища, ніж для лезової, що свідчить про більшу чутливість відповідних технологічних середовищ до зміни умов реалізації й стану об'єктів, які їх утворюють.

Середнє значення відносної похибки визначення величини m_{IT} коефіцієнта оперативної зміни точності розмірів для групи методів точіння й шліфування деталей з конструкційних вуглецевих сталей становило 2,5 %, а шорсткості m_{Ra} – 11,0 %. Залежності характеристик технологічних середовищ рівня операції від стану утворюючих їх об'єктів адекватно описуються за допомогою лінійних регресійних моделей або кусково-лінійно апроксимуються при відносній похибці, що не перевищує 10% (рисунки 6.12, 6.13).

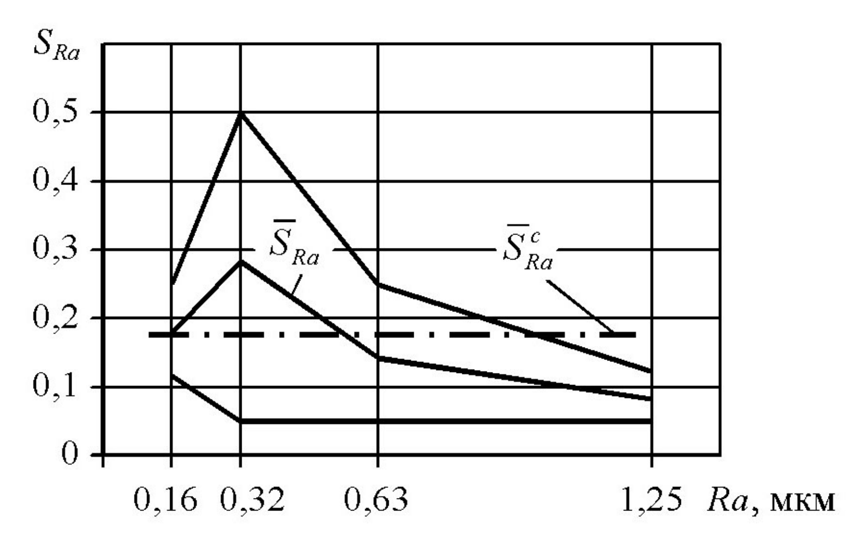


Рисунок 6.12 – Залежність коефіцієнта S_{Ra} від початкової шорсткості сталевих заготовок на суперфініші:

$\overline{S}_{Ra}$ – середнє арифметичне значення; $\overline{S}^c_{Ra}$ – усереднене постійне значення

Установлено, що збереження й взаємний вплив властивостей особливо проявляються при плосковершинній алмазно-абразивній обробці, поліруванні й суперфініші, коли припуск який знімається, перебуває у межах вихідної висоти нерівностей шорсткості.

Багатозв'язковість технологічних середовищ, відмінність фізичних процесів, що супроводжують взаємодію середовищ із предметом праці, є основною причиною відсутності єдиного методичного підходу до визначення

елементів матриці [k_{ij}]. Коефіцієнти збереження й взаємного впливу властивостей k_{ij}, що формуються, визначають при реалізації наскрізного технологічного процесу виготовлення виробу при безперервному дослідженні стану якості предмета виробництва.

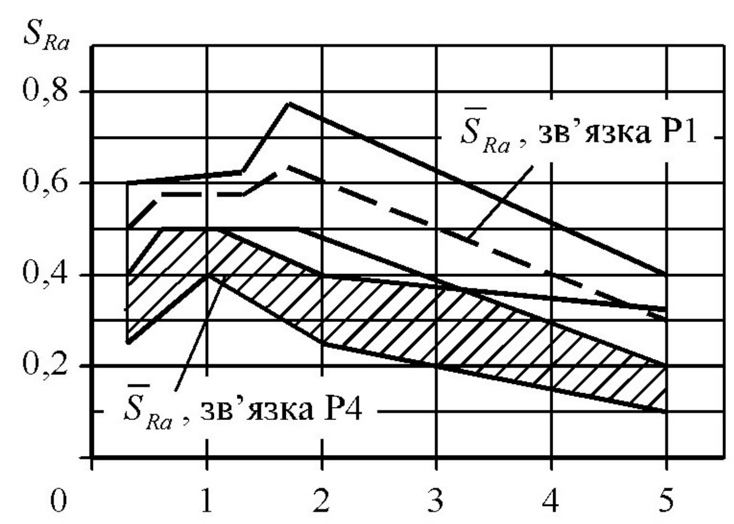


Рисунок 6.13 – Залежність коефіцієнта S_{Ra} від початкової шорсткості сталевих заготовок при шліфуванні абразивною стрічкою
($\overline{S}_{Ra}$ – середнє арифметичне значення коефіцієнта)

Первинне значення k_{il} для початкової фази процесу

$$k_{il} \approx \frac{\left(K_i\right)_{0,1} - S_{ij}\left(K_i\right)_0}{\left(K_i\right)_0} \tag{6.24}$$

де $\left(K_i\right)_{0,1}$ – значення показника K_i до та після виконання операції; $\left(K_i\right)_0$ – значення показника K_i до початку виконання операції; S_{ij} – коефіцієнт зміни показника якості при взаємодії предмета виробництва з технологічним середовищем рівня операції. На відміну від m_i, u_i коефіцієнти k_{il} мають фізичну розмірність.

Запропонований апарат опису трансформації показників якості з урахуванням їх взаємодії та взаємного впливу в багатозв'язних технологічних середовищах адекватний реальним процесам формування властивостей виробів машинобудування й може бути використаний для прогнозування технологічних рішень. Застосування запропонованого підходу дозволяє у 2…5 разів зменшити відносну похибку попереднього визначення значення показника якості в порівнянні із значенням, отриманим на основі відомих закономірностей технології машинобудування.

Розгляд взаємного впливу технологічних факторів при взаємодії технологічних середовищ із предметом виробництва дає змогу внести відповідні уточнення в розрахунково-аналітичний метод визначення сумарної похибки механічної обробки. Виникаючі при обробці заготовки похибки

взаємозалежні й впливають одна на одну та сумарну похибку обробки. Складові похибки формуються як у результаті взаємодії заготовки з технологічним середовищем рівня операції, так і з технологічним середовищем рівня процесу.

У результаті був розроблений математичний апарат визначення значень складових і сумарної похибки обробки. Для перших справедливе:

$$\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j^T = \begin{bmatrix} 1 & a_{\Delta Y,\varepsilon} & a_{\Delta Y,\Delta H} & a_{\Delta Y,\Delta u} & a_{\Delta Y,\Delta T} \\ a_{\varepsilon,\Delta Y} & 1 & a_{\varepsilon,\Delta H} & a_{\varepsilon,\Delta u} & a_{\varepsilon,\Delta T} \\ a_{\Delta H,\Delta Y} & a_{\Delta H,\varepsilon} & 1 & a_{\Delta H,\Delta u} & a_{\Delta H,\Delta T} \\ a_{\Delta u,\Delta Y} & a_{\Delta u,\varepsilon} & a_{\Delta u,\Delta H} & 1 & a_{\Delta u,\Delta T} \\ a_{\Delta T,\Delta Y} & a_{\Delta T,\varepsilon} & a_{\Delta T,\Delta H} & a_{\Delta T,\Delta u} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{\partial j}^T \quad (6.25)$$

де $\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_j^T$ – вектор-стовпець значень складових похибок (похибка, що викликана пружними деформаціями; похибка встановлення; похибка налаштування; похибка, що викликана розмірним зношуванням; похибка, що викликана тепловими деформаціями), які обумовлені з урахуванням взаємного впливу; *a* – коефіцієнти трансформації похибок, котрі враховують взаємний вплив похибок; $\begin{bmatrix} \Delta Y \\ \varepsilon \\ \Delta H \\ \Delta u \\ \Delta T \end{bmatrix}_{\partial j}^T$ – вектор-стовпець детермінованих значень складових похибок, визначених на основі традиційного розрахунково-аналітичного методу.

Квадрат підсумкового значення сумарної похибки *Δ* представляють у формі

$$\Delta^2 = \left[\lambda_i P_i\right]^T \left[P_i\right], \quad (6.26)$$

де λ_i – коефіцієнти, що визначають форму кривої розподілу, складової похибки P_i; T – символ транспонування.

Урахування багатозв'язковості технологічних середовищ при визначенні сумарної похибки обробки дозволяє більше ніж у 2 рази підвищити точність існуючого методу розрахунків.

Розроблений апарат опису трансформації властивостей виробів дає можливість у бажаний спосіб розподіляти рівні властивостей виробу за етапами технологічного процесу його виготовлення. Для будь-якої частини наскрізного технологічного процесу виготовлення виробу й для кожної із властивостей останнього на основі розробленої методики може бути визначений і за необхідності оптимізований бажаний рівень значень відповідних показників якості. Так по завершенні заготівельного переділу досягнуті значення квазістабільних $K_c^з$ і мінливих $K_v^з$ показників якості визначають:

$$\begin{cases} K_c^з = S_c^з K^м + k_c^{з,м} K^м \\ K_v^з = S_v^з K^м + k_v^{з,м} K^м \end{cases}, \tag{6.27}$$

де $K_c^з$, $K_v^з$ – коефіцієнти зміни властивостей предмета виробництва у результаті його взаємодії з технологічним середовищем рівня заготівельного переділу; $K^м$ – значення показників якості вихідного матеріалу; $k_c^{з,м}$, $k_v^{з,м}$ – коефіцієнти збереження й взаємного впливу властивостей вихідного матеріалу, що проявляються на заготівельному етапі наскрізного процесу виготовлення виробу.

Аналогічні співвідношення можуть бути визначені для переділів виготовлення деталей і складання виробу. Ці співвідношення можна розглядати як макромодель формування властивостей виробу в наскрізному технологічному процесі його виготовлення. Практично для будь-якого N етапу групи операцій можуть бути отримані співвідношення виду

$$K_N = H_N \cdot K^м, \tag{6.28}$$

де K_N – значення сформованого після етапу N показника якості; H_N – коефіцієнт трансформації властивостей виробу стосовно вихідних $K^м$.

Уведенням безлічі критеріїв оптимізації можна перейти до розв'язання завдань оптимізації значень показників якості для кожного етапу (операції) технологічного процесу. Оскільки не всі показники якості рівнозначні з позиції технологічного забезпечення їх значень, доцільно визначати бажані рівні не для всіх, а лише для важкозабезпечуваних показників якості, вважаючи при цьому «за замовчуванням», що інші показники будуть забезпечені. Використання «паспорта» предмета виробництва, що включає, наприклад, для деталі дані про значення показників якості, які найбільш складно досягнути, й загальне число її поверхонь, дозволяє коректно понизити розмірність розв'язуваних технологічних завдань.

Розподіл рівнів властивостей у поєднанні з визначенням кількісних характеристик можливої трансформації властивостей дає змогу принципово змінити існуючі підходи до побудови технологічних процесів.

Для успішного виконання заданої безлічі функцій технологічне середовище повинне бути забезпечене необхідними резервами. Резерв технологічного середовища утворюють безлічі її характеристик і значень останніх, що не використовуються при виконанні середовищем заданих функцій та умов їх реалізації. Оцінювання середовища за кожним з її параметрів може проводитися на підставі запропонованих кількісних характеристик. Середовище будь-якого рівня повинне обов’язково мати резерв за параметрами (можливостями), величина якого має оптимально відповідати безлічі виконуваних функцій та діапазону можливих змін умов їх реалізації. Вибір технологічних середовищ і кожного з технологічних об’єктів, що мають раціональні резерви, може ефективно здійснюватися на базі запропонованого апарату оцінювання якості відповідних технологічних розв’язків. Формування резерву середовища може виконуватися за кожним з окремо взятих її параметрів та повинне враховувати як стохастичний характер останніх, так і їх взаємодію.

З урахуванням впливу всього циклу виготовлення деталі на її експлуатаційні властивості розроблений алгоритм (рисунок 6.14), відповідно до якого за необхідних експлуатаційних властивостей рекомендуються значення параметрів стану поверхневого шару готової деталі й формується технологічний процес її виготовлення, що забезпечує зазначені параметри, призначаються режими різання, характеристики інструмента й обладнання, марка МОТЗ, що забезпечують необхідні параметри стану поверхневого шару заготовки й напівфабрикату на кожному етапі обробки [96].

Технологічний алгоритм включає такі етапи:

- виходячи з експлуатаційних властивостей і умов експлуатації елементарних поверхонь деталі, встановлюють вимоги до стану поверхні деталі;
- на основі математичних моделей або в базі даних за необхідним станом поверхневого шару визначають режими обробки, інструмент, обладнання, МОТЗ, необхідні для реалізації остаточної обробки заданої деталі;
- за параметрами стану поверхневого шару визначають режими обробки, інструмент, обладнання, МОТЗ, необхідні для реалізації попередньої операції (переходу) обробки.

Проектування технологічних процесів виготовлення виробів з урахуванням взаємного впливу показників якості, які формуються, малоефективне поза його автоматизацією на базі сучасної обчислювальної техніки. Проектування одиничних маршрутних технологічних процесів (МТП) виготовлення деталей бажано здійснювати в режимі автоматизованого синтезу при мінімальному діалозі користувача із системою. Стратегія розв’язання проблеми автоматизованого синтезу МТП із урахуванням закономірностей зміни, збереження й взаємного впливу показників якості, що формуються, передбачає:

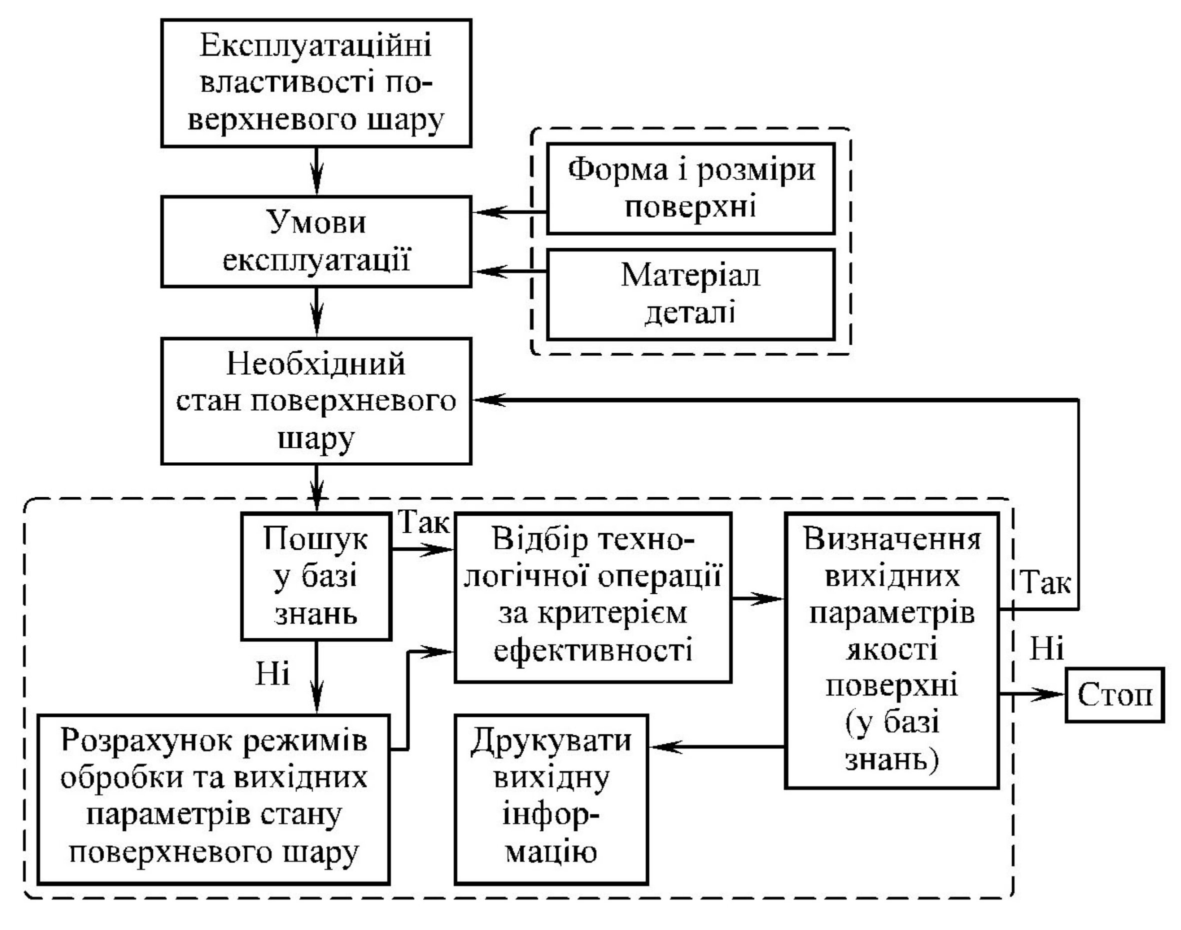


Рисунок 6.14 – Технологічний алгоритм

- виконання синтезу МТП в автоматизованому режимі на базі загальнотехнологічних принципів і одержання основних характеристик маршруту;
- прогнозування зміни показників якості з урахуванням закономірностей трансформації властивостей на основі структури сформованого МТП;
- виконання необхідного коректування МТП у випадку, якщо бажаний рівень значень показників якості не досягнуто.

Автоматизована генерація технологічних середовищ заданого рівня щодо виділеного об’єкта принципово можлива на основі їх функціональних моделей, створених із застосуванням CALS-технологій. Функціональні моделі багатозв’язкових технологічних середовищ дозволяють залежно від постановки задачі, яка розв’язується, здійснювати редукцію її розмірності шляхом виділення безлічі суттєвих зв’язків і стримування несуттєвих при збереженні коректності й адекватності.

Ефективність запропонованого апарату опису трансформації властивостей виробів визначають достатністю інформаційного забезпечення, основу якого становлять дані про значення характеристик трансформації властивостей для відповідних умов взаємодії технологічних середовищ різних рівнів із предметом виробництва.

РОЗДІЛ 7
МОДЕЛІ МЕХАНІКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СПАДКУВАННЯ

Коректному зниженню розмірності задачі опису трансформації властивостей сприяє заміна безлічі об'єктів, які взаємодіють з виробом, одним об'єктом — технологічним або експлуатаційним середовищем за тотожності результатів такої заміни. Визначення характеристик багатозв'язкового середовища дозволяє при відомих результатах його взаємодії з виробом знаходити раціональні значення його показників якості й здійснювати спрямоване формування технологічного та експлуатаційного середовища. Ці середовища повинні передбачати сприятливий розвиток корисних властивостей і припинення розвитку властивостей, що знижують якість виробів, шляхом використання технологічних і експлуатаційних бар'єрів [97, 98].

Особливо актуальне зниження розмірності задачі опису трансформації властивостей при створенні нових інтенсивних методів обробки, основаних на поєднанні в одному процесі різних видів енергії або різних способів впливу на оброблюваний матеріал [99].

У загальному вигляді системна модель технології [100, 101] представляється комбінацією трьох вхідних потоків: речовини, енергії, інформації. Метод обробки доцільно розглядати у вигляді підсистем — матеріальної та інформаційної. Перша доставляє й перетворює енергію, необхідну для впливу на заготовку з метою зміни її фізико-хімічних властивостей, зняття або нанесення матеріалу. Вона визначається видом процесу обробки. Друга керує потоками енергії й речовини, забезпечуючи їх доставку в необхідній кількості в задане місце робочого простору з метою забезпечення певної форми, розмірів і властивостей виробу.

У результаті під методом обробки розуміють сукупність енергетичних й інформаційних процесів, спрямованих на зміну форми, розмірів, якості поверхні й фізико-хімічних властивостей конструкційного матеріалу [100, 101].

Технологічне спадкування розглядають як сукупність складних явищ переносу всього комплексу параметрів якості деталі, причому залежних один від одного. У той же час технологічне спадкування не може бути описане простими одномірними моделями, а припускає наявність більш складних зв'язків у вигляді функціоналів. Розроблення моделей технологічного спадкування у вигляді системи функціоналів вимагає знання фізичних закономірностей формування поверхневого шару деталей машин.

Серед технологічних методів, що підвищують довговічність деталі на завершальних стадіях технологічного маршруту, у виробництві широко використовують методи поверхневого пластичного деформування (ППД). Практика показала, що при правильно призначених режимах ППД можна збільшити довговічність деталі у 5 разів і більше, у той час як неправильно призначені режими обробки й неврахування нагромадження властивостей на попередніх операціях можуть привести до руйнування поверхневого шару вже

при виготовленні або до передчасного руйнування деталі при експлуатації [12, 13, 23, 97, 102].

7.1 Накопичення деформацій та вичерпання запасу пластичності

Традиційний технологічний процес зміцнюючої обробки, орієнтований на підвищення довговічності деталей машин, включає у себе низку операцій чорнового, напівчистового й чистового різання й наступне ППД. У сукупності це вимагає розгляду процесів механічної обробки й експлуатації у часі та явищ, що властиві цим процесам, завдяки яким вони й здійснюються – явищ проходження пластичної деформації. Подібне можливо, якщо досліджують процес пластичного перетікання металу в деякому осередку деформації, властивості поверхневого шару розглядають як результат цього пластичного перетікання, а процес експлуатації – як триваючий процес зміни цих властивостей [103].

Відзначимо основні особливості технологічного проектування експлуатаційних властивостей виробів машинобудування [97, 98]:

1. Високі темпи розвитку машинобудування, безперервна поява нових матеріалів та ускладнення умов експлуатації машин вимагають зниження строків конструкторсько-технологічної підготовки виробництва за рахунок скорочення експериментальних робіт і збільшення розрахункових. У зв’язку із цим з’являється необхідність створення складніших, але й достовірніших моделей поведінки металу під навантаженням, що особливо важливо при проектуванні процесів пластичної зміцнюючої обробки.

2. Більші обсяги конкретних даних не завжди можуть бути покладені в основу сучасних автоматизованих методик проектування технологічних процесів. Для цього необхідно виявлення й опис фізичних зв’язків між досліджуваними явищами і процесами, систематизація та структуризація отриманої інформації у вигляді, придатному для застосування сучасних інформаційних технологій.

3. Складність розкриття закономірностей технологічного спадкування полягає у тому, що різні стадії навантаження поверхневого шару (наприклад, різання, поверхневе пластичне деформування, експлуатаційне втомне навантаження) до цього часу розглядалися із залученням різних понятійних апаратів і методологій.

Незважаючи на всю складність явищ, що проходять у поверхневому шарі, сучасна наука дає змогу описати його з використанням основних положень механіки середовищ, що деформуються. Сутність цього підходу полягає у тому, що фізичний стан поверхневого шару визначається як результат пластичного перетікання металу в осередку деформації, яка відбувається в умовах складного напружено-деформованого стану. У зв’язку з таким підходом поряд із традиційними параметрами стану поверхневого шару, такими, як шорсткість, хвилястість, твердість, залишкові напруження, використовують відомі з механіки деформування параметри, такі, як ступінь деформації зрушення Λ і ступінь вичерпання запасу пластичності Ψ.

Відомо, що стадії ППД передує чистова або напівчистова обробка різанням, яка приводить до нагромадження деформацій і частковому вичерпанню запасу пластичності металу. Отже, матеріал поверхневого шару перед обробкою ППД уже має властивості, відмінні від вихідних, що приводить до більшої границі текучості, наявності залишкових напружень, певної мікрогеометрії поверхні. Усе це говорить про необхідність ураховувати історію навантаження поверхневого шару при різанні й вплив цієї історії як на процес навантаження, так і на формування властивостей поверхневого шару на стадії ППД.

Крім того, обробка ППД найчастіше використовується з метою підвищення циклічної довговічності в умовах прикладання втомних навантажень.

Такий науковий підхід допускає наявність базових (онтологічних) уявлень, з одного боку, про безперервне формування якості поверхневого шару і відповідно експлуатаційних властивостей протягом усього процесу виготовлення деталі й, з іншого – про вплив стану (накопичених властивостей) поверхневого шару на довговічність деталей машин.

Подамо такий опис у термінах і категоріях механіки деформування й руйнування із використанням сучасних CALS-технологій з позицій безперервного формування та трансформації властивостей поверхневого шару на стадіях різання, поверхневого пластичного деформування й експлуатаційного втомного навантаження на основі структурних моделей.

В основі пропонованого підходу лежать уявлення про безперервне нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності металу в поверхневому шарі деталі під впливом програм навантаження.

У загальному вигляді життєвий цикл представлено стадіями різання, поверхневого пластичного деформування і втомного навантаження, що складається, своєю чергою, із двох стадій – циклічної довговічності й циклічної тріщиностійкості (рисунки 7.1 і 7.2).

При розв’язанні задач механіки як вихідних характеристик металу використовують криву зміцнення $\sigma_i = \sigma_i(e_i)$, криву граничної пластичності $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ і діаграму циклічної тріщиностійкості $V_{тр} = V_{тр}(K)$ у координатах «коефіцієнт інтенсивності напружень K – швидкість зростання втомної тріщини $V_{тр}$».

Припускається, що у вихідному стані метал заготовки не зміцнений, чому відповідає ступінь деформації зсуву $\Lambda_\Sigma = 0$, ступінь вичерпання запасів пластичності $\Psi_\Sigma = 0$ і тензор залишкових напружень $[T\sigma_{зал}] = 0$.

Уведення й переміщення інструмента при різанні приводять до виникнення осередку деформації з певним напружено-деформованим станом (НДС), який контролюється програмою навантаження $\Lambda(\Pi)_{різ}$ і представляється у координатах «показник схеми напруженого стану Π – ступінь деформації зсуву Λ». В осередку деформації відбувається пластичне перетікання металу, що приводить до нагромадження деформацій $\Lambda_{різ}$, вичерпання запасу пластичності $\Psi_{різ}$, виникнення залишкових напружень $[T\sigma_{зал}]_{різ}$ і формування поверхневого шару з певними властивостями.

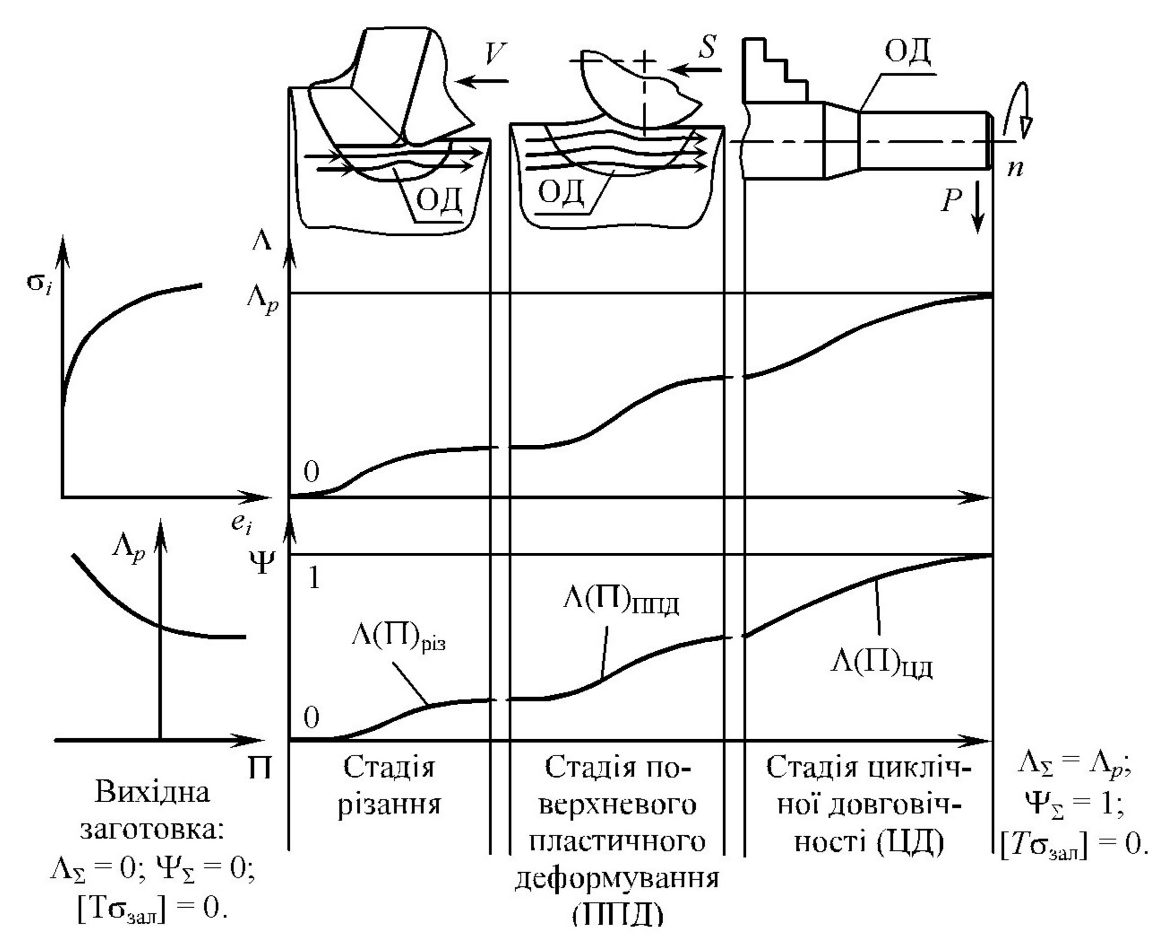


Рисунок 7.1 – Схема формування і трансформації властивостей поверхневого шару в рамках механіки технологічного спадкування

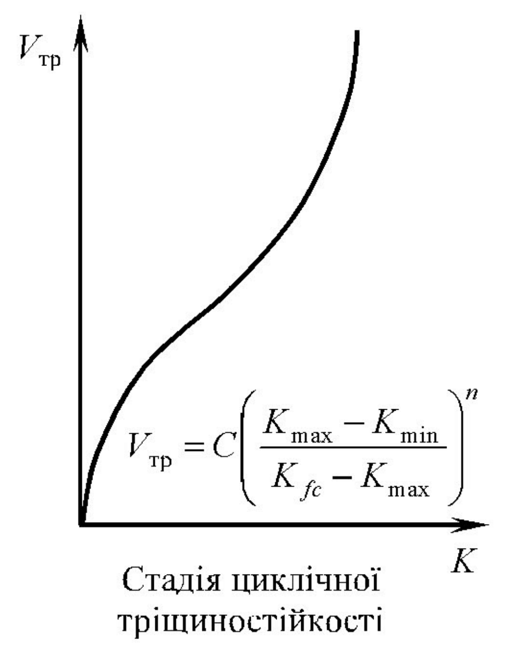


Рисунок 7.2 – Діаграма циклічної тріщиностійкості

Наступне навантаження на стадії ППД приводить до виникнення осередку деформації, що залежить від наслідуваних властивостей (історії навантаження), у якому, своєю чергою, тривають деформаційні процеси. Під впливом програми

навантаження $\Lambda(\Pi)_{ппд}$ формується поверхневий шар з накопиченою за дві стадії деформацією $\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_{різ} + \Lambda_{ппд} = \Lambda_{мех}$ і вичерпаним запасом пластичності $\Psi_{\Sigma} = \Psi_{різ} + \Psi_{ппд} = \Psi_{мех}$. По закінченні обробки ППД у деталі залежно від накопиченої деформації сформовано новий залишковий напружений стан, який описується тензором $[T\sigma_{зал}]_{ППД}$.

У процесі наступного експлуатаційного циклічного навантаження під впливом програми навантаження $\Lambda(\Pi)_{цд}$ триває нагромадження деформацій до деякого граничного рівня Λ_p, якому відповідає ступінь вичерпання запасу пластичності (СВЗП) $\Psi = 1$. При цьому тензор залишкових напружень у кожному циклі навантаження $[T\sigma_{зал}]_{цд}$ поступово релаксує до нульового стану $[T\sigma_{зал}] = 0$. Цьому моменту відповідає зародження початкової тріщини й закінчення стадії циклічної довговічності.

Подальший розвиток тріщини описується в категоріях діаграм циклічної тріщиностійкості $V_{тр} = V_{тр}(K)$. Залежно від історії навантаження в найбільш загальному випадку тріщина може розташовуватися на деякій глибині від поверхні $h_{тр}$. Подальший розвиток дефектів буде відбуватися як у напрямку до поверхні, так і в глибину поверхневого шару. У вершинах тріщини розташовуються області (осередки деформації), у яких метал перебуває у стані пластичного перетікання. На більших відстанях від вершини тріщини напружений стан описується коефіцієнтом інтенсивності напружень K, що залежить від тензора діючих утомних (циклічних) напружень $[T\sigma_{зал}]$ і напружень від тріщини, яка з'явилась.

У межах пластичної зони напружений стан як і раніше визначається показником схеми, а нагромадження пошкодження також описується ступенем вичерпання запасу пластичності. У цьому контексті можна говорити про те, що й на стадії циклічної тріщиностійкості наявна програма навантаження, що представляється в традиційних координатах, причому дія цієї програми навантаження обмежується, як і на попередніх стадіях, тільки розмірами пластичної області. Ймовірно, що тензор напруженого стану на стадії циклічної тріщиностійкості також трансформується у кожному циклі, причому найбільш «жорстка» схема має місце в усті тріщини.

Можна говорити про те, що в осередках пластичної деформації в усті тріщини триває накопичення деформації й вичерпання запасу пластичності, приводячи до порушення суцільності в нових шарах матеріалу й зростання початкових розмірів тріщини. У міру збільшення розмірів дефекту відбувається збільшення напруженого стану й збільшення швидкості вичерпання запасу пластичності. В кінцевому підсумку це приводить до збільшення швидкості зростання тріщини й руйнуванню деталі по всьому перерізу (розділенню на частини).

При цьому параметри видимої тріщини, координати її розташування, граничний K_{th} і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{fc} і відповідні їм швидкості зростання тріщини, а також число циклів до її появи залежать від наслідуваного механічного стану поверхневого шару деталі.

Опис складного явища технологічного спадкування – це в першу чергу опис впливу складного знакозмінного характеру проходження пластичної

деформації в попередні періоди часу на формування властивостей на стадії навантаження, що розглядається.

Розв’язання задач у такій постановці не означає відмови від традиційних уявлень про якість поверхневого шару деталей машин. У той же час це означає, що для більш повного й глибокого вивчення технологічного спадкування базові (онтологічні) закономірності формування поверхневого шару, накопичені на попередніх стадіях розвитку науки, залучаються у вигляді граничних або початкових умов при розв’язанні задач механіки.

Створення методики наскрізного автоматизованого проектування зміцнюючого технологічного процесу на базі принципів механіки технологічного спадкування вимагає розроблення документованих розрахункових процедур у єдиних термінах і категоріях феноменологічної теорії. Своєю чергою, це потребує проведення структурування й інформаційної інтеграції великого обсягу технологічної інформації при використанні сучасних CALS-технологій, що описують концепцію й ідеологію інформаційної підтримки всіх стадій життєвого циклу.

Тому для розв’язання поставлених задач із використанням єдиної інтегрованої моделі виробу та його життєвого циклу розроблено комплекс функціональних моделей, моделей процесів і моделей станів поверхневого шару. Для цього використано методологію структурного аналізу SADT (Structural Analysis and Design Technology) та її реалізацію відповідно до вимог стандартів серії *IDEF* і програмного продукту BPwin.

7.2 Модель процесу формування і трансформації поверхневого шару

У термінах і категоріях *IDEF3* кожний функціональний елемент на графічній моделі позначає стадію процесу навантаження (рисунок 7.3) [99, 100, 101, 104, 105]. Стрілки або лінії відображають переміщення об’єкта (деталь із певним станом поверхневого шару) у ході процесу навантаження. Кожний елемент цієї схеми може мати довільну послідовність декомпозицій, тобто може бути деталізований з кожною необхідною точністю. Особливістю моделі процесу є можливість математичного опису кожної стадії в категоріях кінетичної моделі у вигляді системи рівнянь, що визначають розвиток деформаційних процесів у поверхневому шарі.

Допускається, що стан поверхневого шару відомий і для випадку відпаленого матеріалу заготовки (елемент 1.1.2 на рисунку 7.3) описується в категоріях механіки деформування як

$$\begin{cases} \Lambda_{ij|i=0,\,j=0} = 0; \\ \psi_{ij|i=0,\,j=0} = 0; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ [T\sigma_{зал}]_{ij|i=0,\,j=0} = 0, \end{cases} , \qquad (7.1)$$

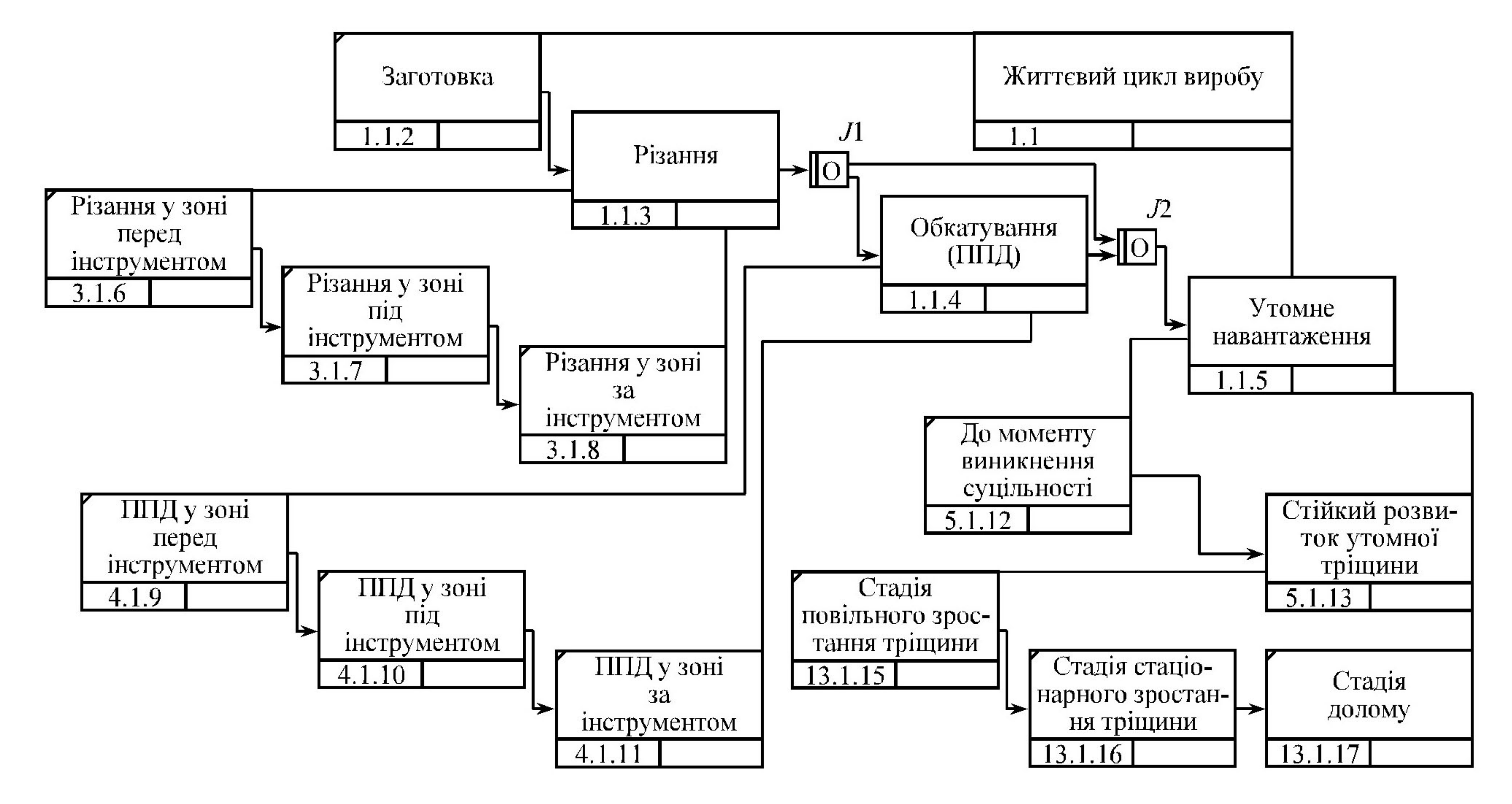


Рисунок 7.3 – Графічна модель процесу вичерпання запасу пластичності

де i відповідає номеру стадії навантаження, а j – номеру квазімонотонного етапу на цій стадії. Іншими словами, відома діаграма пластичності для певного матеріалу, тензор залишкових напружень дорівнює нулю, дефекти в поверхневому шарі відсутні.

Перша стадія – стадія різання – стартує з початкових нульових значень деформації й показника вичерпання запасу пластичності (елемент 1.1.3, рисунок 7.3). За три етапи квазімонотонної деформації накопичується деформація $\Lambda_{різ}$, частково вичерпується запас пластичності на величину $\Psi_{різ}$, у поверхневому шарі виникають залишкові напруження, що описуються тензором $[T\sigma_{зал}]_{різ}$.

Стан поверхневого шару після обробки різанням є початковим для стадії ППД. На стадії ППД (елемент 1.1.4, рисунок 7.3) у процесі навантаження й створення осередку пластичної деформації відбувається зняття залишкових напружень, отриманих після обробки різанням. За три етапи квазімонотонної деформації проходить подальше нагромадження пластичної деформації й вичерпання запасу пластичності, що приводить у результаті до нового стану поверхневого шару з певним ступенем деформації зсуву, СВЗП і тензором залишкових напружень.

Величина $\Psi_{ППД}$ являє собою пошкодження, накопичене на другій стадії з урахуванням історії навантаження. Накопичене значення пошкодження являє собою суму СВЗП 1-ої та 2-ої стадій навантаження, тобто стадій механічної обробки. При цьому залишковий напружений стан залежить від сумарної накопиченої деформації.

Стадія експлуатаційного втомного багатоциклового навантаження (елемент 1.1.5, рисунок 7.3) складається, своєю чергою, зі стадії циклічної довговічності й стадії циклічної тріщиностійкості.

Початковий стан для стадії циклічної довговічності описується величинами $\Lambda_{мех}$, $\Psi_{мех}$ і $[T\sigma_{зал}]_{ППД}$. Ця стадія характеризується подальшим нагромадженням деформацій, що відбуваються в умовах спільної дії тензорів експлуатаційних (втомних) $[T\sigma_{втом}]$ і залишкових $[T\sigma_{зал}]_{ППД}$ напружень. Стискаючі залишкові напруження після обробки ППД приводять до більш м'яких схем втомного навантаження. Тензор діючих напружень являє собою суму тензорів залишкових і втомних напружень.

Процес багатоциклового втомного навантаження так само, як різання і ППД, описується програмами навантаження, властивими кожному квазімонотонному етапові (циклові) навантаження. У кожному втомному циклі навантаження відбуваються нагромадження ступеня деформації зсуву й часткова релаксація залишкових напружень, що приводять до зміни показника схеми; у момент закінчення стадії циклічної довговічності тензор залишкових напружень дорівнює нулю.

На стадії циклічної довговічності під впливом тензора діючих напружень накопичується деформація $\Lambda_{цд}$ і пошкодження $\Psi_{цд}$. У результаті за 3 стадії – різання, ППД та циклічного навантаження – нагромадилася гранична деформація й відбулося повне вичерпання запасу пластичності в деякій точці ймовірного руйнування металу поверхневого шару деталі. Цьому стану

відповідає $\Psi = 1$, кількість циклів становить $N_{цд}$, а в поверхневому шарі виникає видима тріщина (елемент 5.1.12, рисунок 7.3).

Подальше втомне навантаження (стадія циклічної тріщиностійкості) описується в категоріях діаграм циклічної тріщиностійкості, реалізованих у координатах «коефіцієнт інтенсивності напружень K – швидкість зростання втомної тріщини $V_{тр} = db_{тр}/dN$», де символом $b_{тр}$ позначено характерний розмір втомної тріщини. На цій діаграмі виділяють три ділянки (етапи), які характеризуються різними швидкостями зростання тріщини (елементи 13.1.15–13.1.17, рисунок 7.3). Розвиток видимої тріщини починається із граничного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th}, а закінчується в'язким руйнуванням зразка (деталі), що відповідає критичному коефіцієнту інтенсивності напружень K_{fc}.

Закінченню процесу втомного навантаження відповідає повне розділення деталі, що описується параметрами циклічної в'язкості руйнування.

На різних стадіях і етапах життєвого циклу зміцненої деталі можливе застосування таких впливів, які збільшують їх тривалість. У першу чергу це – термічні впливи, що дозволяють повністю або частково відновити первісні властивості (запас пластичності металу). Це можуть бути й механічні впливи, що змінюють характер прикладання навантажень та створюють у самому виробі новий механічний стан і т. д. Структура моделі процесу й кінетичних рівнянь дозволяє врахувати інші термічні та механічні стадії навантаження.

7.3 Стан поверхневого шару при обробці й експлуатації деталі

Формування уявлень про технологічне спадкування пов'язане із закономірностями формування осередків деформації на кожній з розглянутих стадій навантаження. На емпіричному рівні потрібно визначити необхідні параметри, що спадкуються, в ланцюзі досліджень «режим обробки – осередок деформації – програма навантаження – механічний стан поверхневого шару – якість поверхневого шару – довговічність».

Для цього були описані фундаментальні закономірності формування й трансформації властивостей поверхневого шару, що формується в осередку деформації. Своєю чергою, розв'язання вищезгаданих завдань вимагає знання базових закономірностей (онтологій) формування й трансформації осередків деформації за стадіями навантаження. З метою систематизації, візуалізації й логічної завершеності проведено опис онтології з використанням методології стандарту онтологічного дослідження *IDEF5* [99, 100, 101, 104, 105]. Була виділена область даних, у якій існують об'єкти декількох порядків (від вищого до нижчого). Відношення між об'єктами представлено у вигляді схем, що показують зв'язки між ними. При цьому в об'єктів виділено кілька станів або властивостей, які при зовнішніх впливах у межах області даних можуть змінюватися, трансформуватися і т. д.

Модель станів, що відображає суть процесу виготовлення й експлуатації виробу з погляду технологічної спадковості, показана на рисунку 7.4. Відповідно до цієї схеми об'єкт «Стан поверхневого шару» має 5 станів,

причому перехід з попереднього в наступний відбувається під впливом відповідної програми навантаження, що формується в осередку деформації. Всякому стану поверхневого шару властивий певний набір параметрів і певні співвідношення цих параметрів.

До таких параметрів відносять параметри мікроструктури *М*, механічні – накопичений ступінь деформації зсуву *Λ*, ступінь вичерпання запасу пластичності *Ψ* і тензор залишкових напружень $[T\sigma_{зал}]$, геометричні — шорсткість – *Ш* та хвилястість – *Х*.

Стан поверхневого шару СПШ МО ЦД на стадіях механічної обробки МО різанням і ППД і циклічної довговічності ЦД описується тими самими параметрами. Вплив на поверхневий шар індентором (ріжучим або деформуючим інструментом) чи шляхом прикладання циклічних навантажень приводить до виникнення осередку деформації ОД і до пластичного перетікання матеріалу в умовах певного напруженого стану. Наслідком цього є нагромадження деформацій, контрольоване програмами навантаження ПН. У результаті відбувається вичерпання запасу пластичності й поява поверхневого шару з певною твердістю, шорсткістю, мікроструктурою та залишковими напруженнями. Можна виділити такі закономірності формування поверхневого шару.

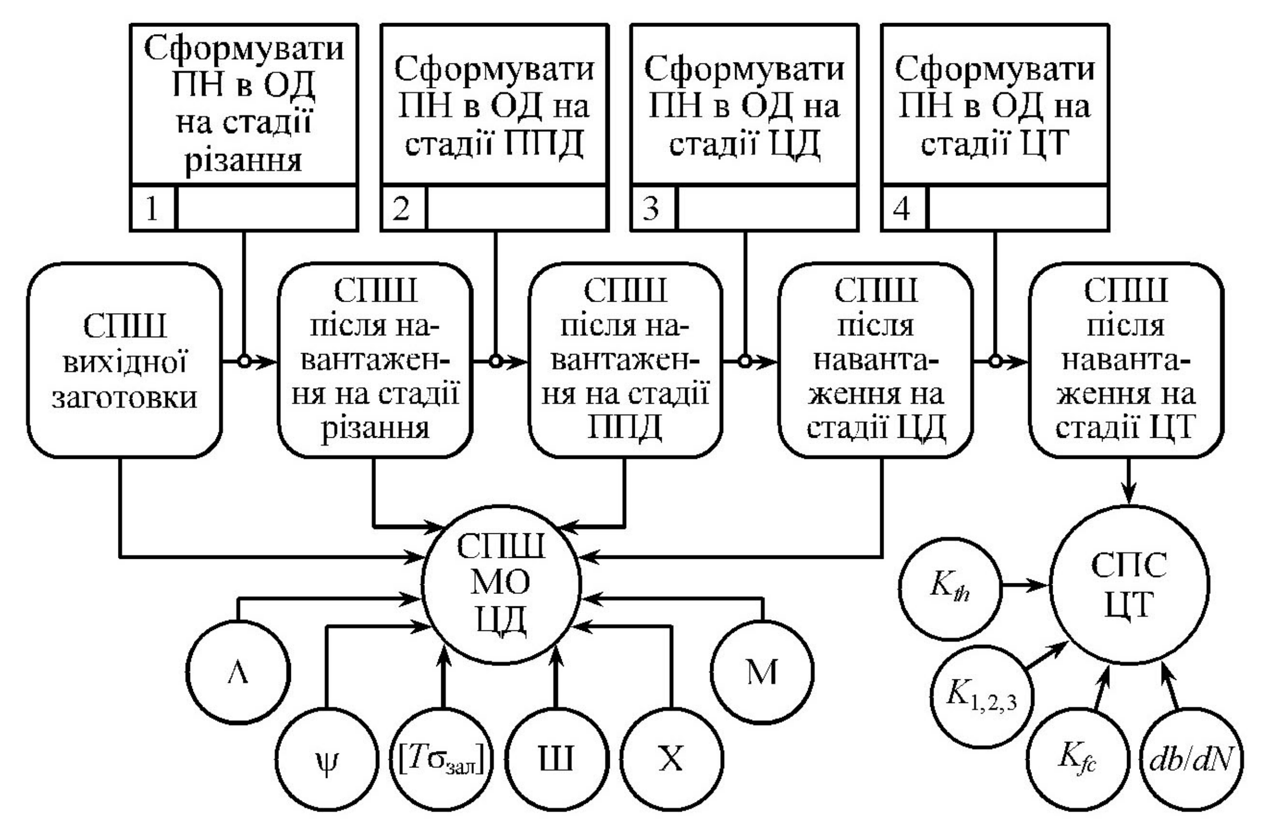


Рисунок 7.4 – Модель станів поверхневого шару деталі за стадіями навантаження: ЦД – циклічна довговічність; ЦТ – циклічна тріщиностійкість

1. По ходу технологічного процесу механічної обробки й наступного втомного навантаження в осередку деформації відбувається поступове нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності, що є

наслідуваними параметрами поверхневого шару. Формування ОД на кожній наступній стадії відбувається під впливом цих наслідуваних властивостей.

2. Формування програми навантаження в ОД на кожній наступній стадії відбувається під впливом спадкоємної інформації.

3. Кожна наступна ПН стартує з накопиченого (наслідуваного) значення ступеня деформації зсуву й ступеня вичерпання запасу пластичності.

4. Формування тензора залишкових напружень на кожній наступній стадії визначається накопиченою деформацією і її розподілом за глибиною зміцненого шару.

5. Картину зміцнення дає опис у категоріях деформаційних параметрів, доповнений описом розподілу твердості (мікротвердості) за глибиною зміцненого поверхневого шару.

6. Параметри мікрогеометрії – шорсткість і хвилястість – залежать не тільки від умов навантаження, але й від характеру нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності.

Наслідувані параметри поверхневого шару – ступінь деформації зсуву, ступінь вичерпання запасу пластичності, тензор залишкових напружень, мікрогеометрія поверхні – проявляють себе на стадії циклічної довговічності. Тензор залишкових напружень підсумовується з тензором напружень від зовнішнього навантаження, створюючи тензор діючих напружень. Тензор діючих напружень формує програму навантаження, яка описує подальше нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності. Інтенсивність цього процесу визначається історією й режимом навантаження. У поверхневому шарі є підшари з «жорсткою» схемою навантаження, де найбільш імовірна поява несуцільності до моменту повного вичерпання запасу пластичності й повне руйнування (розділення) зразка (деталі) на частини.

Таким чином, опис технологічного спадкування з єдиних методологічних позицій допускає використання програм навантаження в осередку деформації на кожній стадії, оцінку характеру їх трансформації в міру нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності. Результати експериментальних досліджень базових (онтологічних) закономірностей формування осередків деформації та їх впливу на формування й трансформацію стану поверхневого шару стали основою перетворення механічних уявлень про формування поверхневого шару в технологічні.

7.4 Функціональна модель технологічного проектування

Оцінка проблеми, розроблення теорії й функціональних моделей і їх аналіз дали змогу сформувати сукупність моделей процесів та станів поверхневого шару, що описують закономірності технологічного спадкування в категоріях механіки деформування й руйнування. Однак на етапі фізичної реалізації результатів досліджень виникає необхідність трансформації опису і приведення цих результатів до вигляду, зручного для інженерного використання. Із цією метою функціональна модель механіки була розширена й описана в термінах і категоріях технології машинобудування. При цьому модель механіки ТС є

складовою частиною або, як прийнято говорити, підфункцією функції більш високого рівня.

Головна мета етапу фізичної реалізації – забезпечити необхідну довговічність виробу на стадіях механічної обробки й у процесі експлуатації. Тому як контекстна функція вибрана «Розробити технологічний процес (ТП) зміцнюючої обробки, який забезпечує необхідний стан поверхневого шару (ПШ) виробу з урахуванням ТС» [99, 100]. У цьому випадкові функція включає всі можливі стадії життєвого циклу виробу, в тому числі втомне навантаження та можливі технології із часткового відновлення запасу пластичності металу (рисунок 7.5).



Рисунок 7.5 – Функціональна модель *А*0 рівня:
батьківський блок (ярлики і семантика назв)

Ресурс – «Базова інформація» і «Стан поверхневого шару». «Базова інформація» включає дані, що містяться у конструкторських документах, програму випуску, а також умови експлуатації виробу. «Стан поверхневого шару» – початковий для проектування технологічного процесу стан поверхневого шару.

Продукт – «Технологічний процес, що забезпечує необхідний стан поверхневого шару деталі з урахуванням технологічного спадкування». Реалізація цього технологічного процесу дозволяє одержати поверхневий шар з необхідними параметрами, що забезпечують задану довговічність деталі на стадії втомного навантаження з урахуванням технологічного спадкування.

Керуючі впливи – «Керівна інформація (КІ)» та «Історія навантаження (ІН)». Керівна інформація міститься в стандартах усіх рівнів на технологічні процеси, обладнання й оснащення, а також у документації на перспективні ТП, виробничих інструкціях. Історія навантаження відображає стани поверхневого шару після виконання попередніх операцій (впливів на поверхневий шар).

Механізм реалізації функції – «Виконавець». Це слід розуміти так, що ТП механічної обробки формує людина, а забезпечує виконання цієї технології вибраний (призначений або розрахований) режим навантаження поверхневого шару виробу.

Виклик (запит) – « База даних технологічної спадковості (очн)».   очн являє собою електронне сховище даних, що містить інформацію про правила формування осередків деформації, режими і програми навантаження діючих уніфікованих ТП на вироби-аналоги й прогресивні методи обробки, а також каталоги, номенклатурні довідники, матеріали на вибір технологічних нормативів тощо.

У процесі декомпозиції контекстної функції врахований багаторічний досвід проектування технологічних процесів механічної обробки (рисунок 7.6, таблиця 7.1) [72]. В основі проектування технології за цією методикою лежать   очні сні розрахунки; необхідна точність визначає режими механічної обробки. При цьому параметри якості поверхневого шару розраховують виходячи з відомих режимів за сукупністю емпіричних моделей.

Аналіз точності передбачає розрахунки чисельних значень припусків за технологічними переходами й операціями. Основна методика розрахунків припусків ураховує явище технологічного спадкування, оскільки в її структурі представлені значення висоти нерівностей профілю R_{zi-1}, глибини дефектного поверхневого шару h_{i-1} і сумарних відхилень розташування поверхні $(\Delta_\Sigma)_{i-1}$ на попередньому $i - 1$ переході. Шорсткість поверхні в методиці розрахунків припусків є складовим елементом, який визначає точність механічної обробки. У той же час при оцінюванні стану поверхні шорсткість виступає в ролі параметра якості поверхневого шару.

Можна вважати, що припуск – це «стикувальний» параметр, що визначає, з одного боку, точність механічної обробки, а з іншого – якість поверхневої шару.

Виходячи зі сказаного, здійснено декомпозицію підфункції *A3*, де поряд з розрахунками припусків і режимів (блок *A33*) виконують розрахунки точності (блок *A34*) та якості поверхневого шару (блок *A35*) (рисунок 7.7). Особливістю деталізації подальшого опису є урахування спадкоємних закономірностей, представлених у категоріях механіки технологічного спадкування. Це дістало відображення в декомпозиції блока *A35*, яка повністю відповідає раніше прийнятій функціональній моделі механіки технологічного спадкування (рисунок 7.8). Технологічне спадкування якості поверхневого шару визначають шляхом розв'язання задач механіки (блоки *A351–A353*), за результатами яких відбувається формування програм навантаження поверхневого шару. При цьому підфункція *A354* «Змінити стан поверхневого шару в осередку деформації» ідентична прийнятій функції механіки технологічного спадкування. На вході у блок *A354* як керуючий вплив використовується історія навантаження, а програма навантаження виступає як механізм реалізації цієї підфункції. Параметри якості поверхневого шару (блок *A355*) розраховують з урахуванням установлених фізичних закономірностей ТС, і у випадку одержання незадовільного результату по зворотному зв'язку відбувається коректування структури операції. За підсумками виконання операції проводять фізичний акустико-емісійний (АЕ) або ультразвуковий (УЗ) контроль фізичних параметрів поверхневого шару (блок *A356*).

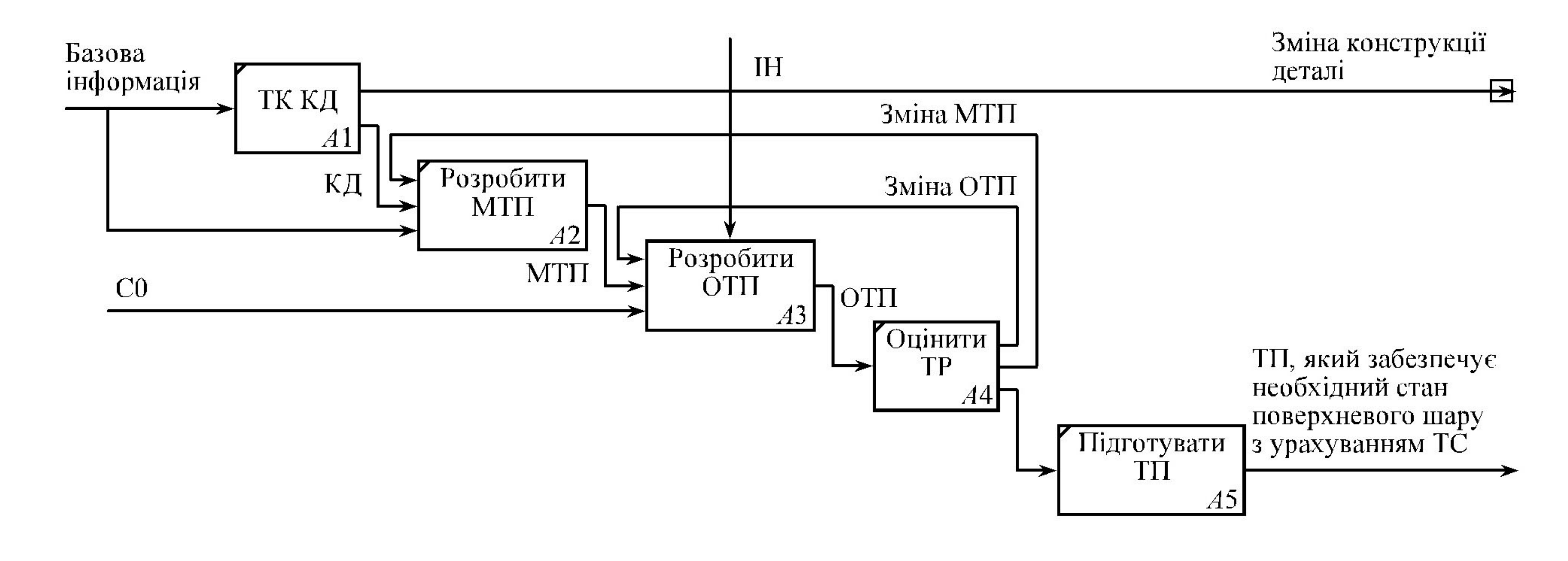


Рисунок 7.6 – Декомпозиція функціональної моделі механіки технологічного спадкування (ТС) *А*0 рівня: С0 – початковий стан поверхневого шару; ТК КД – технологічний контроль конструкторської документації; КД – конструкторська документація; МТП – маршрутний технологічний процес (ТП); ОТП – операційний технологічний процес; ТР – технологічне рішення; ТД – технологічна документація; ІН – історія навантаження

Таблиця 7.1 – Схема індексації вузлів

Індекс вузла	Індекс підвузла 1-го рівня	Індекс підвузла 2-го рівня	Семантика вузлів
А0			Розробити ТП зміцнюючої обробки, який забезпечить необхідний стан поверхневого шару (ПШ) з урахуванням ТС
А1 *А2* *А3* *А4, А5*			Блоки-потомки, що деталізують батьківський блок *А0*
А1			Виконати технологічний контроль конструкторської документації
А2			Розробити маршрутний технологічний процес
А3			Розробити операційний технологічний процес
	А31		Визначити структуру операцій
	А32		Вибрати засоби технологічного оснащення (ЗТО)
	А33		Розрахувати припуски та режими обробки
	А34		Розрахувати точність обробки
	А35		Розрахувати якість поверхневого шару
		А351	Визначити геометричні параметри осередку деформації
		А352	Розрахувати напружено-деформований стан (НДС)
		А353	Розрахувати програму навантаження
		А354	Змінити стан поверхневого шару в осередку деформації
		А355	Розрахувати параметри якості поверхневого шару
		А356	Виконати акустико-емісійний та ультразвуковий контроль
	А36		Виконати нормування операцій
А4			Оцінити технологічні рішення
А5			Підготувати технологічну документацію

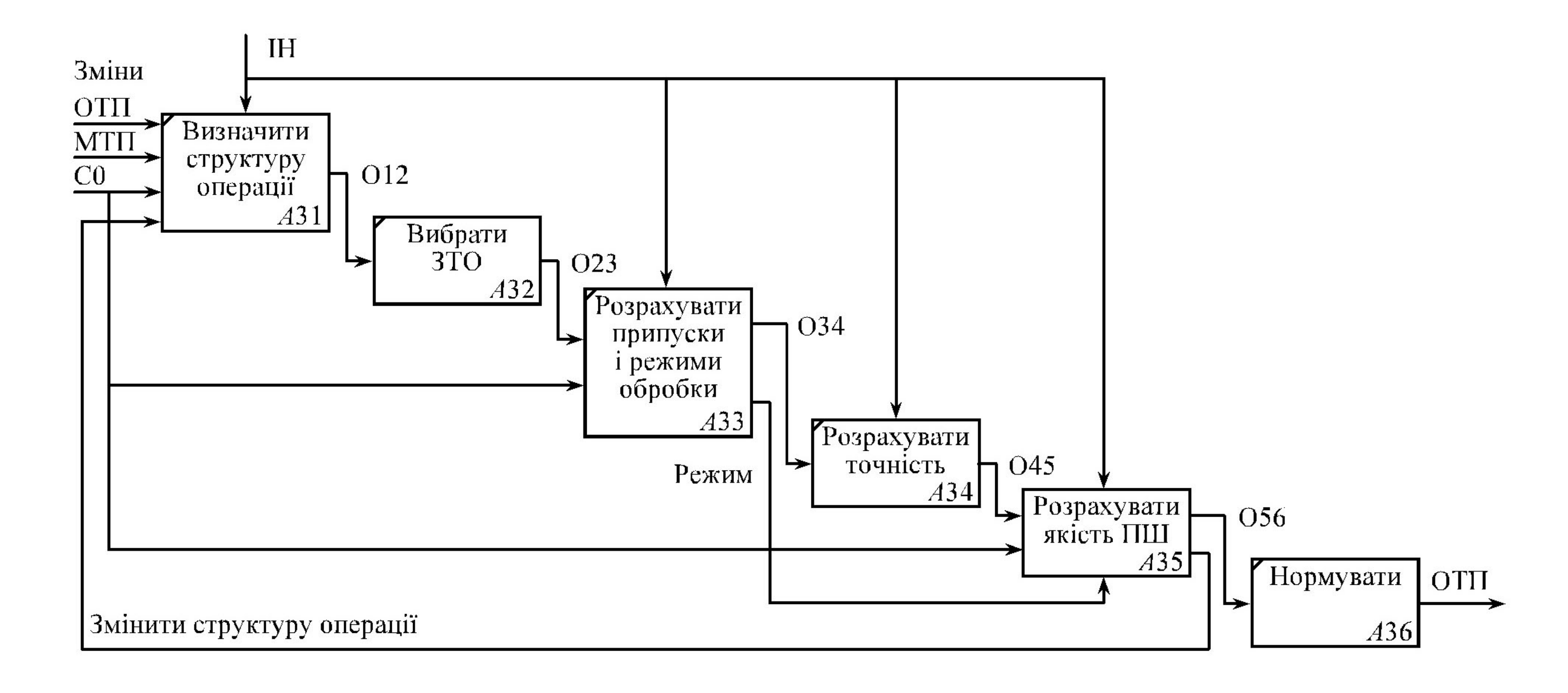


Рисунок 7.7 – Декомпозиція функціональної моделі *A1* рівня:
ПШ – поверхневий шар; ЗТО – засоби технологічного оснащення; О12 – структура технологічної операції; О23 – перелік засобів технологічного оснащення; О34 – припуски на механічну обробку; О45 – параметри точності; О56 – параметри якості поверхневого шару

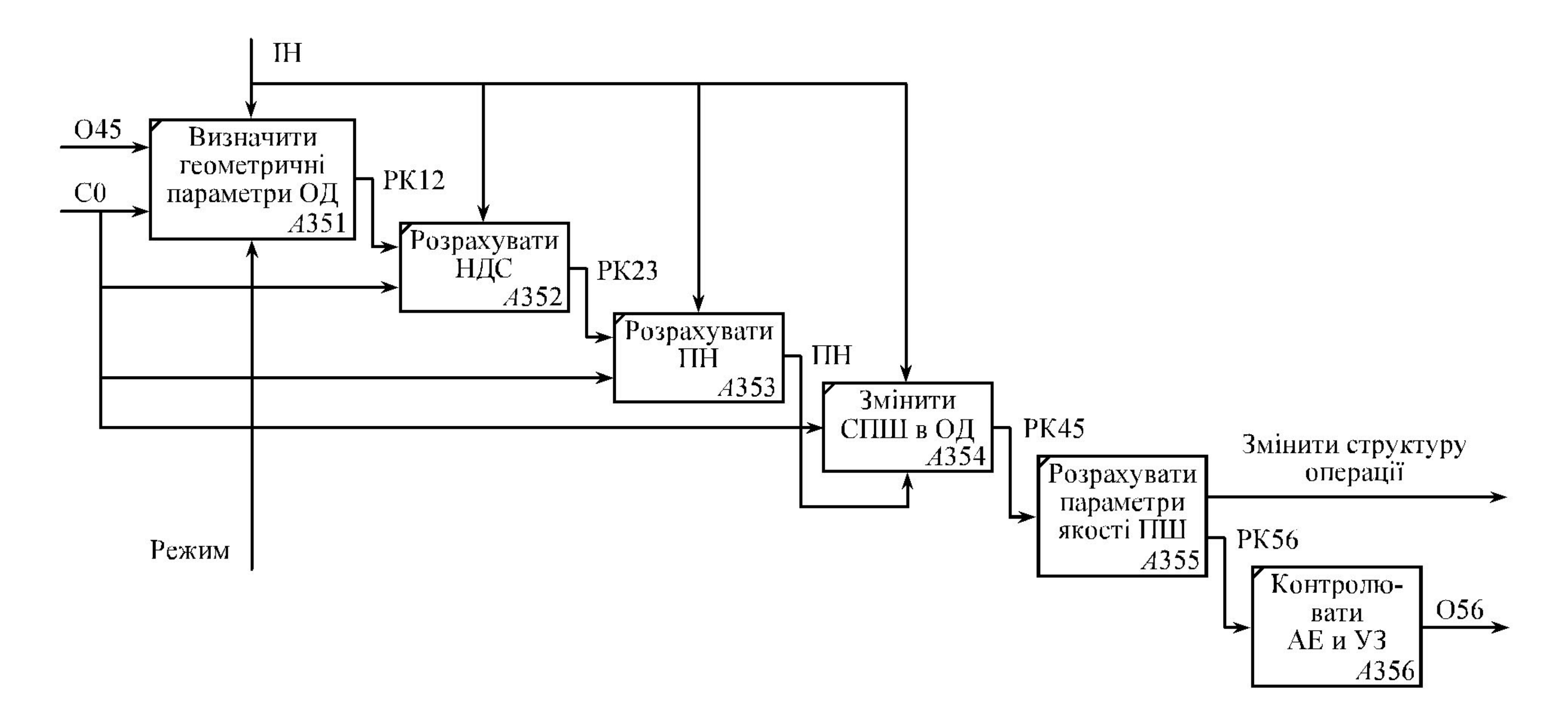


Рисунок 7.8 – Декомпозиція функціональної моделі *А2* рівня:
РК12 – геометричні параметри осередку деформації (ОД); РК23 – параметри напружено-деформованого стану (НДС); РК45 – стан поверхневого шару;
РК56 – параметри якості поверхневого шару

Особливістю розглянутої функціональної моделі є можливість її подальшого розширення й доповнення. За результатами проектування ТП виявлена необхідність розроблення нових методів механічної обробки із цілком визначеними можливостями у плані створення програм навантаження. Використання розрахункових моделей дозволяє сформулювати комплекс вимог і сукупність технологічних параметрів. Тоді функціональна модель може бути декомпозиційована, а інформація уточнена до необхідного рівня деталізації; система зворотних зв'язків дає можливість уточнити правила ТС і внести уточнення в моделі, що враховують історію навантаження.

Виникає необхідність урахування стадії ремонту (часткового або повного відновлення запасу пластичності) деталі. Тоді після виконання підфункції контролю вводиться підфункція ремонту з відповідною системою зворотних зв'язків і т. д.

На етапі впровадження наукових розробок можливе розширення контексту та використання таких важливих підфункцій, як до-проектне дослідження виробництва, економічне обґрунтування привабливості інвестицій у пропоновану технологію, уточнення додаткових організаційних і технологічних факторів, передача готового продукту замовникові й ін.

Перетворення сукупності функціональних моделей у модель даних дозволило використовувати їх для розв'язання задач автоматизації проектування технологій зміцнюючої механічної обробки.

Отже, розроблено основні положення системного підходу до проблеми технологічного спадкування. Показано, що при розробленні системи правил ТС повинні враховуватися як механізм нагромадження властивостей на цій операції, так і вплив попередніх властивостей на характер цього нагромадження. Підкреслено, що для успішної реалізації інформаційна система, що відображає ТС, має бути адекватно описана, а також необхідно побудувати повні та несуперечливі аналітичні й структурні моделі в єдиних фізичних термінах і категоріях процесів обробки та експлуатації. Використання сучасних CALS- і CASE-технологій у розробленні комплексу структурних і математичних моделей ТС дало змогу провести декомпозицію елементів інформаційної системи на функції, що автоматизуються, аж до конкретних розрахункових та проектних процедур і привести їх до вигляду, зручного для інженерного використання при збереженні цілісності уявлень про наслідуваний стан поверхневого шару.

1. Опрацьовано концепцію механіки технологічного спадкування стану поверхневого шару в єдиних фізичних термінах і категоріях механіки деформування й руйнування у вигляді функціональної моделі, новизною якої є представлення явища ТС як сукупності функціоналів, що описують основні закономірності перенесення властивостей за операціями механічної обробки різанням та поверхневого пластичного деформування (ППД) з наступною експлуатацією деталей в умовах прикладання циклічних навантажень.

2. Розроблено модель процесу технологічного спадкування стану поверхневого шару, що використовує представлення про безперервність нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності на стадіях

життєвого циклу деталі й ураховує складну немонотонну історію навантаження цього поверхневого шару.

3. Побудовано спадкоємну онтологічну модель – модель станів поверхневого шару деталі за стадіями навантаження на операціях різання, ППД і наступного втомного навантаження. Поточний стан і технологічний спадкування поверхневого стану пов'язано із закономірностями формування осередків деформації на кожній з розглянутих стадій навантаження. Визначено необхідні параметри, що спадкуються, в ланцюжку «режим обробки – осередок деформації – програма навантаження – механічний стан поверхневого шару – якість поверхневого шару – довговічність».

4. Функціональну модель механіки ТС розширено й описано у термінах і категоріях технології машинобудування. Розроблено функціональну модель технологічного проектування технологічних процесів, що забезпечують необхідний стан поверхневого шару з урахуванням ТС і відповідно задану довговічність.

РОЗДІЛ 8
МЕХАНІКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО СПАДКУВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

8.1 Механіка технологічного спадкування як наукова основа проектування процесів зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням

Технологічне спадкування (ТС) має враховуватися при проектуванні технологічних, особливо зміцнюючих процесів поверхневого пластичного деформування (ППД). Незважаючи на всю складність явища ТС, сучасна наука дозволяє описати явища, які проходять у поверхневому шарі, з використанням положень механіки середовищ, що деформуються. Згідно з положеннями механіки середовищ, що деформуються, на всіх стадіях життєвого циклу (ЖЦ), уключаючи різання, ППД і експлуатаційне втомне навантаження деталі, відбувається безперервне нагромадження деформацій і вичерпання запасу пластичності металу. При нагромадженні граничних деформацій і повному вичерпанні запасу пластичності металу Ψ у поверхневому шарі деталі виникає несуцільність у вигляді тріщини, поведінка якої надалі описується в категоріях механіки руйнування. Інтенсивність проходження цих явищ залежить від програм навантаження металу (ПН). Вона залежить від історії процесу пластичної деформації й визначається, своєю чергою, режимами обробки й експлуатації деталей машин [106].

Оцінювання якості металу поверхневого шару проводилося за допомогою феноменологічного критерію «ступінь вичерпання запасу пластичності (СВЗП)», який ураховує історію навантаження металу:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = n\varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_p} - \varphi_0 \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_i^{n-1} d\Lambda \right), \qquad (8.1)$$

де Ψ_1 – складова, яка залежить від напруження текучості або від накопиченої деформації; Ψ_2 – складова, що залежить від пластичності металу в умовах сталості показника схеми напруженого стану $\Pi = \sigma/T = \text{const}$; σ – середнє напруження; T – інтенсивність дотичних напружень; Λ і Λ_p – накопичений і граничний ступінь деформації зсуву при заданому Π; n – коефіцієнт деформаційного зміцнення; φ_0 – коефіцієнт, що визначається на основі випробувань на пластичність. У незміцненому металі $\Psi = 0$, а при повному вичерпанні запасу пластичності $\Psi = 1$.

Як базова модель при розв’язанні завдань механіки технологічного спадкування якості поверхневого шару на стадіях механічної обробки використана феноменологічна модель формування поверхневого шару при ППД, розроблена в МДТУ «МАМІ» В.М. Смілянським. Відповідно до цієї моделі в зоні контакту інструмента з деталлю виникає асиметричний осередок деформації (ОД), напружено-деформований стан якого характеризується

тензорами напружень і швидкостей деформацій, а формування поверхневого шару відбувається в результаті деформації часток поверхневого шару по лініях струму [106].

Розроблена концептуальна модель механіки технологічного спадкування стану поверхневого шару на стадіях життєвого циклу деталі. Математична модель процесу вичерпання запасу пластичності на стадіях ЖЦ деталі представлена системою кінетичних рівнянь, що описують ТС як безперервний процес формування поверхневого шару по стадіях і етапах з урахуванням складної немонотонної історії навантаження.

У вихідному стані в металі поверхневого шару відсутні деформації й пошкодження, тензор залишкових напружень має нульове значення

$$\begin{cases} \Lambda_{ij|i=0,\ j=0} = 0; \Psi_{ij|i=0,\ j=0} = 0; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); [T\sigma_{зал}]_{ij|i=0,\ j=0} = 0. \end{cases} \tag{8.2}$$

На стадії різання (i = 1) в осередку пластичної деформації нагромадження ступеня деформації зсуву $\Lambda_{різ}$ і вичерпання запасу пластичності $\Psi_{різ}$ відбувається у межах кожного із трьох установлених квазімонотонних етапів (j = 3), на границях яких відбувається часткове заліковування дефектів відповідно до феноменологічної моделі (8.1); залишкові напруження в обробленому поверхневому шарі характеризуються тензором $[(T\sigma)_{зал}]_{різ}$.

Навантаження на стадії ППД (i = 2) приводить до релаксації залишкових напружень і подальшого нагромадження деформацій та вичерпання запасу пластичності металу на трьох квазімонотонних етапах деформування в ОД від рівня, досягнутого на стадії різання. У підсумку це приводить до нового стану поверхневого шару з певним ступенем деформації зсуву, пошкодженнями і залишковими напруженнями [106]:

$$\begin{cases} \Lambda_{ij|i=2,\ j=0} = \Lambda_{різ}; \Psi_{ij|i=2,\ j=0} = \psi_{різ}; \\ \Lambda_{ij|i=2,\ j=3} = \sum_{j=1}^{j=3} \Lambda_j = \Lambda_{ППД}; \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ \Psi_{ij|i=2,\ j=3} = \Psi_{ППД} = \int_{\Lambda_{різ}}^{\Lambda_{ППД}} \left[n\varphi_0 \Lambda_j^{n-1} + \left(1 - \varphi_0 \Lambda_p^n\right) \frac{1}{\Lambda_p} \right]; \\ \Lambda_{мех} = \Lambda_{різ} + \Lambda_{ППД}; \Psi_{мех} = \Psi_{різ} + \Psi_{ППД}; \\ [T\sigma_{зал}]_{ij|i=2,\ j=0} = [T\sigma_{зал}]_{різ}; [T\sigma_{зал}]_{ij|i=2,\ j=1} = 0; \\ [T\sigma_{зал}]_{ij|i=2,\ j=3} = [T\sigma_{зал}]_{ППД}. \end{cases} \tag{8.3}$$

На стадії циклічної довговічності (i = 3) відбувається подальше нагромадження деформацій. Це відбувається в умовах дії показника схеми

напруженого стану $П_д$, який визначається як результат спільної дії експлуатаційних (втомних) $(Tσ)_{втом}$ і залишкових $[(Tσ)_{зал}]_{ППД}$ напружень. У процесі циклічного навантаження у кожному циклі j відбувається поступова релаксація залишкових напружень, що приводить до зміни показника схеми $П_д$. У момент закінчення стадії циклічної довговічності залишкові напруження дорівнюють нулю. Під впливом діючих напружень у поверхневому шарі накопичується деформація $Λ_{ц.д}$ та пошкодження $Ψ_{ц.д.}$ За $N_{ц.д}$ циклів стадії циклічної довговічності в деякій точці ймовірного руйнування зібралася гранична деформація $Λ_p$ і відбулося повне вичерпання запасу пластичності металу ($Ψ = 1$) та виникнення видимої тріщини.

Подальше втомне навантаження (стадія $i = 4$) описується в категоріях діаграм циклічної тріщиностійкості, на яких розвиток видимої тріщини глибиною b починається із граничного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th}, а закінчується в'язким руйнуванням деталі, що відповідає критичному коефіцієнту інтенсивності напружень K_{fc}.

Розроблено систему математичних рівнянь формування й трансформації стану поверхневого шару в термінах і категоріях узагальнених програм навантаження у вигляді $Λ = Λ(П)$ на стадіях різання, поверхневого пластичного деформування й експлуатаційного циклічного навантаження деталей. ПН представлено у вигляді уніфікованих експонентних моделей, відповідно до яких відбувається нагромадження деформації в умовах мінливих схем наслідуваного напруженого стану металу поверхневого шару в осередку пластичної деформації.

Показано, що стан поверхневого шару після кожної стадії навантаження визначається запропонованою системою спадкоємних рівнянь, якими описуються параметри осередків деформації, програми навантаження й стан поверхневого шару, а загальний опис появи спадковості при формуванні програми навантаження i-го етапу за наявності n попередніх етапів презентовано у вигляді функціонала:

$$\left(\text{ПН}\right)_i = F_i\Big(\text{ПН}_{i-1}\Big(\text{ПН}_{i-2}\Big(\text{ПН}_{i-3}...\left(\text{ПН}_{i-n}\right)\Big)\Big)\Big). \qquad (8.4)$$

Викладено результати досліджень механіки ТС стану поверхневого шару деталі в процесах обробки різанням і ППД та втомного навантаження. Завдання розв'язувалися у жорстко- і пружнопластичній постановці з використанням методів ліній ковзання, кінцевих елементів і ділильних сіток. За допомогою спеціально розроблених методик цифрової фото- та відеозйомки досліджено картини перетікання металу в осередках пластичної деформації й отримана сукупність початкових та граничних умов у вигляді координат характерних точок ОД, параметрів зміцнення, умов на контактних і позаконтактних поверхнях й ін. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження механіки технологічного спадкування стану поверхневого шару за схемами послідовного навантаження «різання–різання», «різання–ППД», «різання–ППД1–ППД2–ППД3», «ППД–втома» тощо.

Важливим результатом проведених досліджень стало одержання закономірностей формування залишкових напружень залеж-но від історії навантаження.

Виконано дослідження стадії циклічної довговічності (до зародження втомної тріщини) із застосуванням єдиних зі стадіями механічної обробки різанням і ППД термінів та категорій, що дозволило розвинути уявлення про механіку ТС в область експлуатаційного втомного навантаження.

Результати досліджень доведено до рівня функціоналів спадкоємного типу (ФСТ), побудованих у термінах і категоріях програм навантаження й ступеня вичерпання запасу пластичності, що дозволило скласти нове цілісне уявлення про закономірності формування й трансформації властивостей поверхневого шару деталей машин у спадкоємній постановці.

Розроблено методику автоматизованого проектування зміцнюючих технологічних процесів, яка дозволяє визначати втомну довговічність деталей машин за вибраною структурою технологічного процесу з певним набором режимів обробки або за заданою довговічністю деталей у процесі експлуатації визначати структуру технологічного процесу та відповідно режими обробки. Виконано експериментальні дослідження й розроблено методику технологічного контролю ступеня деформації й ступеня вичерпання запасу пластичності металу поверхневого шару на стадіях різання, ППД і втомного навантаження в термінах та категоріях фізичних ультразвукових й акустико-емісійних сигналів.

8.2 Підвищення якості виробів при технологічному спадкуванні та самоорганізації процесів

Конструкційно-технологічні властивості виробів, що збираються, тісно пов’язані з технологічною спадковістю й самоорганізацією в складальних процесах, тобто спрямованим формуванням якості виробів. Правильне встановлення таких взаємозв’язків (рисунок 8.1) виконують з використанням банків конструкційних і технологічних даних, що відповідають сучасному рівню розвитку техніки [107].

На основі конструкційних вимог установлюють потрібні конструкційні властивості деталей, вузлів і виробу в цілому, а технологічних вимог – їх технологічні властивості, що визначають легкість виготовлення. Потім виконується відпрацьовування конструкції виробу, вузлів і деталей, наділених потрібними властивостями, на технологічність згідно з вимогами конкретного виробництва, наприклад, ручного, автоматизованого й автоматичного, потокового, гнучкого і т. п. та технологічного обладнання й оснащення, яке застосовують при цьому. Після цього розв’язують питання технологічної спадковості при встановленні корисних властивостей та самоорганізації процесів складальної технології, що забезпечує спрямоване формування властивостей та високої якості деталей, вузлів і виробу.

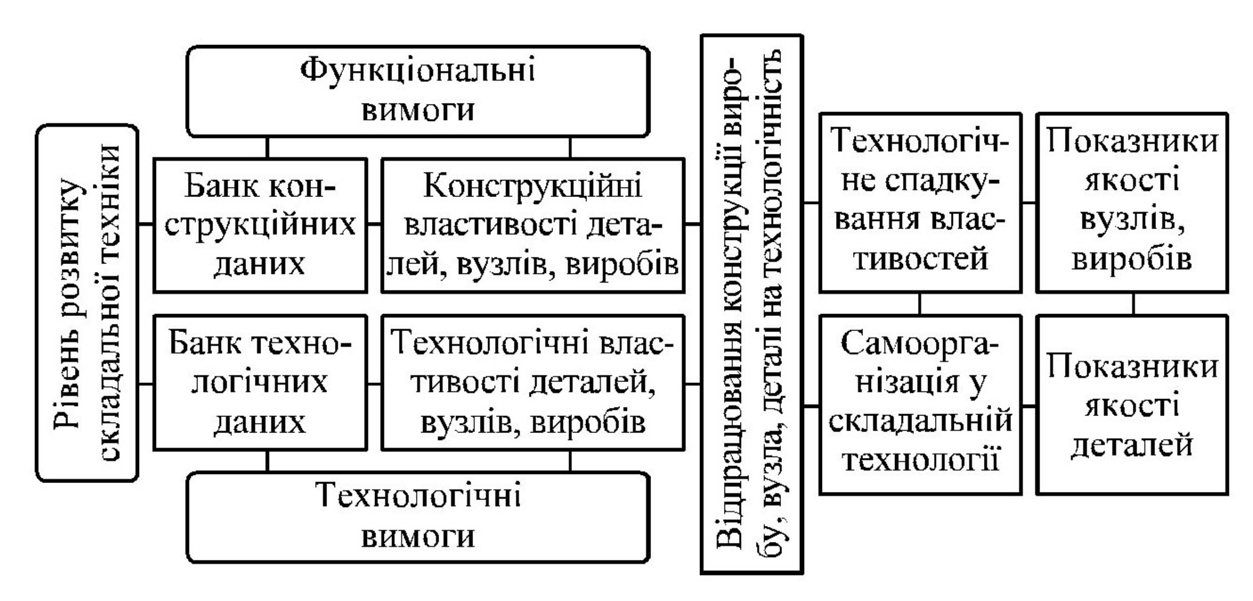


Рисунок 8.1 – Взаємозв'язки при формуванні властивостей складального виробу

Класифікація властивостей конструкції деталей, що збирають, і складальних одиниць, з яких вибирають потрібні, враховує їхню різноманітність за геометричними, механічними, гравітаційними, електромагнітними, пневматичними й іншими критеріями. При цьому властивості можуть бути основними або додатковими, постійними або тимчасовими, чітко або нечітко вираженими, дискретними або безперервними, комплексними або диференціальними, статичними або динамічними, внутрішніми або зовнішніми, що проявляються контактно або безконтактно і т. п. Технологічні властивості деталей, що збирають, доцільно ділити на процесові, операційні та складального обладнання.

Процесові властивості характерні для загального перебігу складальних процесів, і до них можна віднести властивості, що визначають високу продуктивність, потоковість, налагоджуваність, автоматизованість, можливість концентрації й паралелізму виконання, компактність просторових структур технологічних зон виготовлення, новизну способів складання і т. п.

Операційні властивості характеризують легкість виконання окремих елементів складальної операції, таких, як подавання, орієнтування, базування, спряження, контрольованість, транспортування і т. п.

Властивості складального обладнання характеризують ступінь виконуваності на ньому процесу складання (використання можливостей обладнання й оснащення, здатність програмуватися, діагностуватися, стабільність і надійність виконання складання, компактність просторових структур технологічних зон складання, інтелігентність систем керування.

Після технічно й економічно обґрунтованого вибору встановлених і скоректованих властивостей, відпрацьовування конструкцій деталей, вузлів і виробів на технологічність можна переходити до вирішення питань підвищення їх якості шляхом використання таких резервів, як технологічна спадковість корисних властивостей і гальмування шкідливих, а також самоорганізації

окремих елементів при виконанні технологічних операцій. При цьому варто відмітити, що в процесах спрямованого формування властивостей виробів та показників його якості необхідно враховувати цільове призначення виробу, його технічні характеристики, програму випуску, особливості конкретного складального виробництва й майбутньої експлуатації, передбачувані витрати, конкурентоспроможність та інші важливі фактори.

Опускаючи відомі етапи методики проектування традиційних технологічних процесів, можна спинитися на деяких зазначених додаткових. Перше – це спрямоване формування властивостей, під яким мається на увазі комплекс активних технологічних заходів, що забезпечують одержання заданих значень показників якості й відповідних експлуатаційних властивостей виробу.

Вивчення фундаментальних закономірностей взаємодії та взаємовпливу формованих властивостей деталей значно зменшує при цьому вплив випадковості, а також поле розсіювання значень показників якості. Відомо, що кожній експлуатаційній властивості виробу відповідає певне поле розсіювання комплексу показників якості, тому забезпечення окремих показників якості не гарантує потрібні експлуатаційні властивості виробу. Формування властивостей виробу і його деталей можна представити як процес взаємодії предмета виробництва з технологічним і навколишнім середовищем, які є носіями механізму спадкування й трансформації властивостей виробів під час їх виготовлення (рисунок 8.2). Для кожної деталі може бути створене оптимальне технологічне середовище, у якому і будуть формуватися оптимальні експлуатаційні властивості. Таке забезпечення формування властивостей деталей базується на тому, що властивості деталі визначаються властивостями вихідних матеріалів і формуючим технологічним середовищем наскрізного процесу виготовлення, які враховують структурно-параметричний характер такої взаємодії. Задані властивості визначають залежно від конструкційно-технологічних параметрів виробів з урахуванням умов забезпечує реальні властивості деталей, а в результаті порівняльного аналізу заданих та реальних властивостей, знання механізму їх формування й здійснюється формування оптимальних технологічних середовищ, які забезпечують найбільш оптимальні експлуатаційні властивості. Тоді з урахуванням спадкоємних властивостей заготовок і головних закономірностей спадкування й визначається структура при виготовленні та складанні виробів оптимальних технологічних процесів. Процесовий підхід до трансформації властивостей деталей дозволяє будувати моделі трансформації показників якості. Такі моделі повинні бути простими, представляти забезпечення автоматизованого відображення процесу формування властивостей деталей і проведення розрахунків значень заданого комплексу показників якості й мати можливість визначення необхідних характеристик елементів технологічних середовищ залежно від заданого напряму змін властивостей і показників якості.

Суттєво збільшити якість виробів, що випускаються, можна за рахунок різного технологічного впливу на продукт виробництва й у першу чергу більш повного використання ефекту технологічної спадковості та самоорганізації процесів, які відомі були давно, але використовувалися неповно і рідко.

Пояснюється це, мабуть, одним – слабкою вивченістю механізмів впливу цих факторів і тому деякою складністю практичного застосування. Як відомо, під технологічною спадковістю розуміємо зміну експлуатаційних властивостей виробів у часі під впливом технології виготовлення. Експлуатаційні властивості виробів визначаються фізико-механічними властивостями матеріалу складових деталей, станом їх поверхонь та також технологічними процесами їх складання. Тому можна вважати, що технологічна спадковість залежить від усіх технологічних операцій, як виготовлення заготовок, окремих деталей, так і їх складання, й тому їх слід розглядати не ізольовано у відриві одна від одної, а в тісному взаємозв’язку, оскільки спадковість формується комплексно й так само змінюється під час експлуатації виробу.

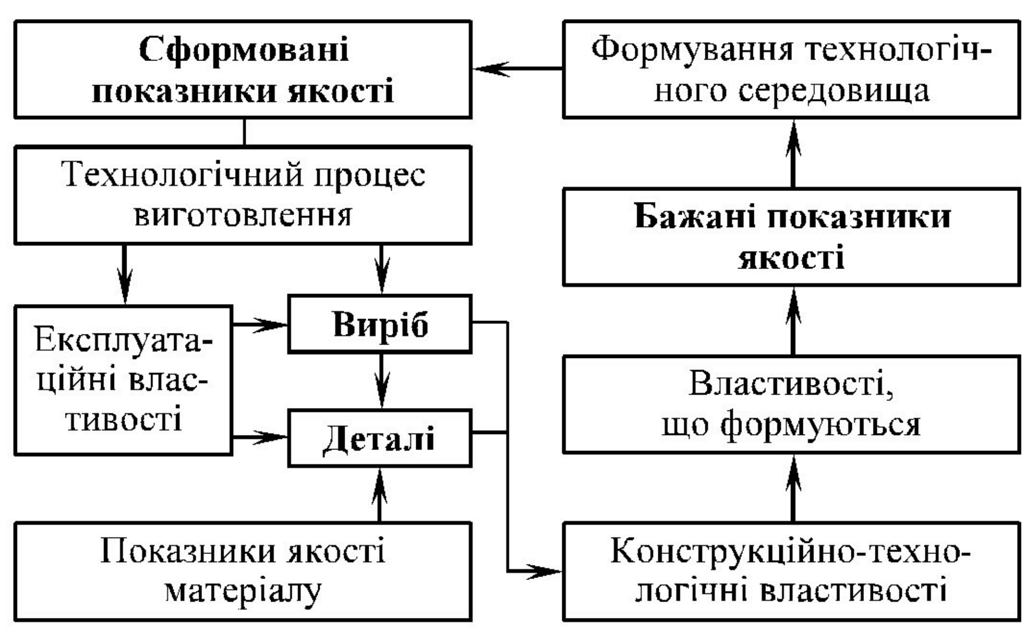


Рисунок 8.2 – Схема направленого формування якості виробів через властивості

Зазвичай технологічна спадковість розглядається обмежно на останній завершальній операції, хоча формується вона під час проходження всього технологічного процесу [108, 109, 110]. Відомо, що вона являє собою явище переносу властивостей заготовок, деталей і їх складання від усіх технологічних переходів та операцій між собою, як взаємний технологічний вплив, котрий дається взнаки при експлуатації на показники якості виробу. При цьому сила впливу технологічних факторів на експлуатаційні властивості буде різною. Вплив одних може підсилюватися, інших – слабшати. Можна відзначити існування своєрідних бар’єрів, які по-різному долаються різними факторами. До таких бар’єрів можна віднести термічні й зміцнюючі операції, вигладжування при шліфуванні тощо. Найбільший інтерес становить вплив операцій поверхневого зміцнення деталей на ослаблення впливу шкідливих факторів технологічної спадковості. Так поверхневий наклеп усуває мікротріщини, вирівнює фізико-механічні властивості, структурні неоднорідності, усуває підвищені напруження, концентратори напружень і т. п.

Тому при розробленні технологічних процесів повинні вводитися операції, що перешкоджають впливу шкідливих факторів.

Самоорганізація технологічних систем полягає у визначенні корисних і шкідливих властивостей, зведенні бар'єрів при технологічному спадкуванні шкідливих властивостей і за їхньою допомогою забезпечення спадковості нових корисних властивостей. Взаємодія технологічних об'єктів у процесах виготовлення виробів приводить до організації різними способами технологічних систем, функціонування котрих розглядається як взаємодія виділеного одного її елемента з навколишнім середовищем. Сутність самоорганізації технологічних систем полягає в її частковій необ'єктивності й зв'язаності з випадковістю. Явища самоорганізації технологічних систем у загальному випадкові описує наука синергетика, а згідно із принципом Бора, як тільки припиняється дія організуючого фактора, то за певних умов може початися самоорганізація такої системи під впливом випадкового фактора, наприклад, розфіксування деталі або інструмента, дії різного роду полів, знос складального інструмента і т. п. Потім у певний момент може початися вплив шкідливих факторів, правильне функціонування технологічної системи припиняється й наступає біфуркація, тобто роздвоєння, що у результаті призводить до зниження показників якості.

Таким чином, зберегти технологічну спадковість окремих деталей при складанні виробу можна лише при правильному ході технологічних процесів. Відомо, що кожна деталь виробу через наявність постійних і випадкових похибок при її виготовленні здобуває свою індивідуальну форму й розміри та не є ідентичною з іншими подібними. При цьому чим точніший вимірювальний засіб, тим більша відмінність. Меншу відмінність мають високоточні деталі, яких не так і багато у виробі. За рахунок цього викривлені й зміщені як осі, так і всі поверхні деталі. При складанні це викликає всілякі перекоси й зсуви поверхонь, що сполучаються, приводить до неправильного їх взаємного розташування деталей у складальних з'єднаннях і супутніх додаткових внутрішніх напружень. Дії таких напружень може значно погіршити експлуатаційні властивості вузлів та виробів, а значить, і їх показники якості. Можна також відзначити приховану причину зниження експлуатаційної якості виробів, яка непомітна до початку експлуатації, але почне впливати тільки при експлуатації виробу.

При виготовленні виробів головна увага приділяється технологічному забезпеченню експлуатаційних властивостей деталей і їх з'єднань [111]. Під головними експлуатаційними властивостями деталей і їх з'єднань розуміють контактну твердість, зносостійкість, міцність посадок, корозійну стійкість і динамічну контактну міцність, фретинг-стійкість, теплопровідність. Технологічне забезпечення контактної твердості базується на рівняннях взаємозв'язку конкретних поверхонь деталей з умовами їх обробки. Технологія має широкі можливості її підвищення за рахунок вибору правильних методів і видів обробки деталей. Наприклад, контактна повторна твердість при черновому точінні перебуває у межах 0,38…27,63 Па/мкм, напівчистовому – 1,5…54,42, чистовому – 9,01…58,98, а при круглому шліфуванні для

зазначених видів обробки становить відповідно 33,78…89,79, 46,63…100,34, 63,18…125,74 Па/мкм. При плоскому шліфуванні ці значення будуть відповідно такими: 8,2…60,3, 26,6…70,1, 48,2…76,2 Па/мкм. Підвищення контактної твердості можна досягти також за рахунок оптимізації режимів різання й урахування технологічної спадковості. Технологічне забезпечення і підвищення зносостійкості деталей досягається технологічним визначенням оптимальних параметрів якості поверхневого шару відповідно до умов експлуатації. Для цього застосовують оздоблювально-зміцнюючу обробку, особливо нові методи поверхнево-пластичної деформації, наприклад, електромеханічну обробку і т. п. Основою зміцнення поверхні є поєднання термічного та силового впливу на поверхневий шар оброблюваної деталі. Такими способами підвищення зносостійкості є нанесення спеціальних покриттів. Технологічне забезпечення й підвищення герметичності з'єднань проводять шляхом призначення необхідних параметрів контактних поверхонь, які забезпечують потрібну герметичність, а потім розробленням технологічного процесу, що дозволить одержати зазначені параметри.

Основними способами обробки різних конфігурацій ущільнювальних поверхонь є точіння, шліфування та притирання. При цьому велике значення має вплив напрямку і параметрів мікро-нерівностей (поперечний, поздовжній, косий), форма контактних поверхонь, схеми їх контакту. Технологічне забезпечення й підвищення корозійної стійкості деталей проводять за рахунок створення відповідної якості поверхневих шарів при механічній і термічній обробці з використанням інгібіторів корозії та різних захисних металевих і неметалевих покриттів. При цьому корозійна стійкість деталей залежить як від якості поверхневого шару, так і властивостей корозійного середовища, умов корозії, виду інгібітору, який використовується, його концентрації, виду покриття, його якості. Технологічне забезпечення корозійної стійкості виконують визначенням значень параметрів якості поверхневого шару деталей, що забезпечується комплексним параметром якості шару, тобто вибором методу обробки робочих поверхонь деталі. Цьому способу надається перевага, але він не має ще достатнього довідкового забезпечення, тому частіше використовується перший спосіб.

Технологічне забезпечення й підвищення опору втоми деталей пов'язане із пластичною деформацією, при якій проходять різні взаємодії дислокацій скупчення вакансій і зародження втомної тріщини. Полягає воно у застосуванні наклепу поверхневого шару деталей, що підвищує втомну стійкість на 25...30 % створенням перешкод збільшенню існуючих та виникненню нових утомних тріщин. Відомий також позитивний вплив залишкових напружень стискання (збільшують границю витривалості сталей на 50 %), а також шорсткості (для відпаленої сталі 45 зменшення границі витривалості з 285 до 200 МПа при збільшенні шорсткості Ra 3,2 до Ra 75 мкм). При цьому великий вплив мають розмір зерна, щільність дислокацій і рівень поверхневої екзоелектронної емісії. Поява втомних тріщин має дислокаційну природу, тому для більш широкого застосування методів технологічного керування втомною міцністю деталей

необхідні подальші дослідження закономірностей формування основних фізичних параметрів поверхневого шару для різних технологічних операцій.

Технологічним забезпеченням і підвищенням міцності з'єднань із натягом можна керувати за рахунок зміни коефіцієнта тертя у посадці й геометричних параметрів поверхонь деталей, що сполучаються. Підвищення міцності з'єднань досягається різними способами і методами, одним із яких є вібронакатування деталей з одержанням гвинтових мікрошліців. Зміною режимів процесу можна технологічно керувати міцністю з'єднань. Вібронакатування підвищує міцність пресових з'єднань на 20 % у порівнянні зі шліфуванням. Найбільший вплив на крутний момент, що передається, здійснює амплітуда осциляції, що пояснюється появою на поверхні вала технологічної хвилястості. Збільшення такої амплітуди зменшує момент, який передається. Великий вплив на величину крутного моменту має також зусилля вібронакатування та діаметр кульок.

У загальному можна відзначити вплив часто використовуваної лезової та абразивної обробки на експлуатаційні властивості деталей. Основними технологічними факторами, які визначають такий вплив, є подача й жорсткість технологічної системи, при алмазно-абразивній – подача і зернистість, а при пластичній – робочий тиск і приведений радіус інструмента. Найбільшими можливостями підвищення експлуатаційних властивостей деталей наділені методи оздоблювально-зміцнюючої обробки поверхнево-пластичною деформацією.

8.3 Методика проектування зміцнюю чого технологічного процесу з урахуванням явища технологічного спадкування

На основі результатів наукових досліджень [112] запропоновано технологічний процес зміцнюючої обробки з урахуванням явища технологічного спадкування. Стан поверхневого шару оцінюють з використанням інтегральних параметрів механічного стану, таких, як ступінь деформації зсуву Λ і ступінь вичерпання запасу пластичності Ψ, контроль та керування якими з використанням методики акустико-емісійного (АЕ) контролю дозволяє забезпечити задану циклічну довговічність деталі.

Використання отриманих результатів дає змогу призначати раціональні режими обробки, що забезпечують необхідну якість поверхневого шару й циклічну довговічність деталі. Для цього необхідно розв'язати задачу розрахунків накопичених деформацій, вичерпання запасу пластичності металу та якості поверхневого шару деталі залежно від параметрів режиму обробки. Із цією метою була розроблена методика АЕ контролю, яка включає програму для ЕОМ, що й дозволяє розв'язувати задачу прогнозування довговічності, як у процесі виготовлення, так і експлуатації виробу.

Для контролю нагромадження й трансформації параметрів якості поверхневого шару була використана модель, отримана для оцінки ступеня вичерпання запасу пластичності від параметрів сигналу акустичної емісії

$$\Psi = a_1 + b_1 \cdot \left[\ln\left(c_1 + \left(c_2 \cdot \exp\left(b_2 + c_2 \cdot t_2 \right) \right) \right) \right]. \quad (8.5)$$

Тут $t \equiv \tau$ виступає як узагальнений критерій, що залежить від параметрів осередку деформації, які, своєю чергою, визначаються технологічними факторами; a_1, b_1 – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних і геометричних параметрів оброблюваних виробів; c_1 – коефіцієнт, що використовується для вирівнювання; b_2, c_2 – коефіцієнти, що залежать від умов поточного навантаження та визначаються із сигналу АЕ.

При розв'язанні задачі вихідними даними на операціях механічної обробки є: матеріал деталі, який характеризується вихідною твердістю HV_0, кривою текучості у вигляді $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon)$ і діаграмою пластичності у вигляді $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$; геометричні параметри різального й деформуючого інструментів ρ, α, γ, φ, φ_1, $R_{пр}$, D_p; товщина шару a, який зрізується при різанні; дійсний натяг ролика $h_д$; подача S; частота обертання деталі n; діаметр деталі $D_д$.

Задачу розв'язують у такій послідовності.

1 За відомими моделями залежно від заданих режимів розраховують геометричні параметри осередку деформації при різанні й поверхневому пластичному деформуванні (ППД), що визначають його форму й розміри.

2 Визначають час проходження осередку деформації вздовж лінії струму матеріальної точки поверхневого шару.

3 З використанням отриманої на стадіях механічної обробки акустико-емісійної інформації встановлюють величину накопиченої енергії сигналу АЕ і потужність, яка при цьому виділилася. Значення ступеня вичерпування запасу пластичності на поверхні визначають за моделлю (8.5), зміненої з урахуванням технологічної спадковості й представленої у такому вигляді:

$$\Psi_0 = -1{,}345 + 0{,}143\left[\ln\left(25000 + W \right) \right]. \quad (8.6)$$

4 Розраховують ступінь деформації зсуву на поверхні Λ_0 за формулою (ця модель коректна для значень $\Psi = 0{,}2 \ldots 0{,}8$).

$$\Lambda_0 = 0{,}3 \cdot \ln\left(20 \cdot \Psi \right). \quad (8.7)$$

5 Розраховують розподіл Λ і Ψ за глибиною поверхневого шару після механічної обробки з поточними режимами за формулами:

$$\left(\Lambda_{мех} \right)_h = \left(\Lambda_{мех} \right)_0 \exp\left(-5{,}52 h^{1{,}5} \right) + 0{,}01. \quad (8.8)$$

$$\Psi_{мех} = 1{,}064 \exp\left[-2\left(\left(\Lambda_{мех} \right)_h - 1{,}27 \right)^2 \right]. \quad (8.9)$$

6 Розраховують циклічну довговічність, яку визначають механічним станом поверхневого шару.

Вихідними даними для розрахунків циклічної довговічності є:

• чисельне амплітудне значення експлуатаційного напруження σ_a на цій глибині, МПа;

• глибина h, на якій розраховують циклічну довговічність;

• ступінь вичерпання запасу пластичності на поверхні після механічної обробки Ψ_0;

• чисельне значення ступеня деформації зсуву на поверхні деталі $(\Lambda_{мех})_0$;

• чисельне значення ступеня деформації зсуву на цій глибині після механічної обробки $(\Lambda_{мех})_h$;

• ступінь вичерпання запасу пластичності на цій глибині після механічної обробки $\Psi_{мех}$; чисельне значення компонента тензора залишкових напружень після механічної обробки $(\sigma_{зал})_x$ на цій глибині в МПа.

Методика була використана при проектуванні технологічного процесу механічної обробки осі колісної пари вагоперевірного візка (сталь 45, 160-180 HV).

8.4 Технологічне спадкування при штампуванні листових матеріалів

Задані експлуатаційні властивості штампованих деталей з листового матеріалу формуються у виробничо-технологічних циклах прокатування й штампування у результаті певної сукупності технологічних рішень. Прийняті технологічні рішення не завжди повною мірою враховують умови виробництва, що є причиною мінливості властивостей, котрі формуються і як наслідок позначаються на якості виробу. Практика показала, що потрібно враховувати не тільки фізико-механічні властивості матеріалу, але і їх спрямованість [113].

Спрямованість властивостей визначає величину та характер анізотропії, деформаційних характеристик листового прокату й експлуатаційні властивості штампованих деталей у певних напрямках. Крім цього, спрямованість властивостей забезпечує керування технологічними процесами формоутворення без руйнування і сприятливе технологічне спадкування властивостей.

Під технологічним спадкуванням мають на увазі явище переносу властивостей від попередніх операцій до наступних. Ці властивості можуть бути як корисними, так і шкідливими. Збереження властивостей називають технологічною спадковістю. У процесі передачі властивостей важливу роль відіграє так звана спадкоємна інформація [12].

Носіями спадкоємної інформації є матеріал, кристалічна і зерниста структура. Носії інформації беруть активну участь у технологічних процесах, проходячи через різні операції прокатування та штампування, зазнаючи впливу технологічних факторів. Але часто невідомими виявляються текстурна морфологія й параметри стану, зумовлені фізико-механічними властивостями матеріалу.

Тому при обґрунтуванні підходу спрямованого формування властивостей листового матеріалу в процесі прокатування необхідно з'ясувати поєднання показників анізотропії, які відповідають вимогам інтенсифікації операцій

листового штампування. Однак на інтенсифікацію операцій листового штампування, крім фізико-механічних характеристик матеріалу (склад, тип кристалічних решіток, розмір зерна, вид термообробки, анізотропія властивостей та ін.) істотний вплив здійснюють технологічні фактори, що проявляються в конкретних умовах виконання операцій (схема напружено-деформованого стану, сила контактного тертя, швидкість деформації, нерівномірність деформації й ін.).

Для розроблення технологічних процесів листового штампування потрібна традиційна інформація про фізико-механічні характеристики матеріалів для визначення допустимих ступенів формозміни й розмірів вихідної заготовки. Крім перерахованих даних, необхідна нетрадиційна інформація, викликана технологічним спадкуванням. У будь-якому технологічному ланцюжкові існують свого роду «бар'єри». Деякі технологічні фактори не можуть подолати ці «бар'єри». В такому випадку їх вплив на експлуатаційні властивості виробу відсутній. Інші фактори, такі, як «бар'єри», проходять, але при цьому значно втрачають свій вплив. До цього часу як «бар'єри» розглядають термічні операції, що обмежує керування технологічними процесами і їх удосконалення.

Для забезпечення якості виробів слід керувати процесом технологічного спадкування. Корисні властивості потрібно розвивати, а негативні послабляти. У ході технологічного процесу успадковуються всілякі властивості оброблюваної заготовки. Виявлення структурних спадкоємних дефектів матеріалів часто відбувається при їх обробці.

Для практичних цілей важливо встановити не тільки якісні, але й кількісні зв'язки технологічного спадкування. В цьому напрямі можна досягти успіху не шляхом накопичення великого експериментального матеріалу, а, навпаки, деякими фундаментально-теоретичними міркуваннями. Тут може допомогти системний аналіз.

Еволюція властивостей будь-яких виробів завжди пов'язана з технологічними процесами їх виготовлення. Кожний об'єкт виробництва несе в собі сліди всіх впливів, що були наявні в минулому. Ця обставина помічена давно, і навіть дістала математичне вираження. Це означає, що всі операції та їх технологічні переходи слід розглядати не ізольовано, а у взаємозв'язку.

Експлуатаційні властивості деталі розглядають як сукупність передбачених стандартом показників призначення і надійності виробу. Доведено, що вони пов'язані з технологічними показниками якості й залежать від комбінації їх значень. Крім того, відомо, що зміна властивостей виробу пов'язана із впливом на об'єкт виробництва технологічних середовищ окремих операцій, а збереження властивостей зумовлене взаємодією об'єкта виробництва з технологічними середовищами. При цьому саме технологічне середовище являє собою сукупність об'єктів виробництва, що взаємодіють з виділеним об'єктом на окремому етапі виробництва. Залежно від рівня розгляду виділеним об'єктом можуть бути: заготовка, деталь, технологічна операція, технологічний процес і т. д.

Технологічну спадковість розглядаємо й вивчаємо у взаємозв'язку окремих елементів системи об'єктів виробництва, тому що детальний опис

технологічних середовищ неможливий. В умовній класифікації виділяють детерміновані (феноменологічні), стохастичні (імовірнісні) і складні системи (синергетичні).

Ця систематизація умовна й вимагає певного рівня розгляду як стаціонарних структур, так і рівня організації процесу. При цьому під системою можна розуміти об'єкт виробництва та і технологічне середовище.

Спадкування властивостей виробу в ході виготовлення характерне як для детермінованих, так і для стохастичних систем. У першому випадкові не виникає ніякої невизначеності в передачі властивостей. Якщо відомі попередні стани системи й спосіб передачі інформації, то можна прогнозувати її наступний стан, наприклад, для випадку спадкування геометричних параметрів. Для стохастичної системи не можна зробити точного прогнозування. Можна лише з більшою або меншою ймовірністю визначити, які будуть спадкоємні властивості виробу. Однак визнання того, що ця система є детермінованою або стохастичною, не може виявити вирішального впливу на розуміння сутності технологічної спадковості. Розглянуте явище неодмінно пов'язане зі станом системи та її змінами у часі. Будь-який об'єкт виробництва перебуває в різноманітних зв'язках і взаємодіях з навколишніми його об'єктами й бере участь одночасно в декількох формах руху. Тому всякий стан об'єкта представляє комплекс умов, у яких цей стан формувався.

Процес формування властивостей, що виконується з волі виготовлювача, допускає жорстке регламентування умови проведення технологічних операцій стосовно об'єкта виробництва. Однак звичайний розгляд регламентів дуже небезпечний, оскільки може привести до похибок у ході процесу та порушення спадкоємних зв'язків.

Досить повно відображають методологію системного підходу принципи фізичності й можливості моделювання структури. Однак складні системи, наприклад, такими є системи зерен, молекул і атомів, мають особливі властивості. Насамперед це унікальність. Кожна система цього класу не має повних аналогів поведінки, в усякому разі, аналоги настільки рідкісні, що їх наявність можна не враховувати.

Складні системи вирізняються слабкою передбачуваністю. Тому ніяке докладне знання морфології й функцій елементів не дозволяють однозначно визначити функції об'єкта виробництва. Однак складні системи володіють здатністю до вибору поведінки. Вони мають системну властивість, якої немає в її елементів при будь-якому способі декомпозиції. Системні властивості формуються шляхом нагромадження, посилення або прояву одних властивостей елементів одночасно з нівелюванням, ослабленням і приховуванням інших при їхній взаємодії. Такий погляд при вивченні складних систем оснований на синергетичному підході. Синергетика, будучи наукою про процеси розвитку й самореалізації складних систем довільної природи, вивчає додаткові ефекти [114, 115].

Складні системи, перебуваючи в різних ситуаціях, можуть проявляти різні властивості, у тому числі й альтернативні. Для зміни поведінки системи

потрібен приріст впливу, що перевершує деяке граничне значення. У результаті система починає мати властивості, відмінні від її властивостей у минулому.

Така поведінка системи схожа з фазовими переходами першого й другого роду. Відповідно до синергетичного підходу фазові переходи відбуваються у результаті самоорганізації, процес якої описують трьома ступенями свободи, що відповідають параметрові порядку, сполученому йому полю й керуючому параметрові.

Використовувати єдиний ступінь свободи – параметр порядку – можливо для опису тільки квазістатичного фазного переходу. В системах, значно віддалених від стану термодинамічної рівноваги, кожен із зазначених ступенів свободи набуває самостійного значення. У них процес самоорганізації складається в результаті конкуренції позитивного зворотного зв'язку параметра порядку з керуючим параметром і негативного зворотного зв'язку зі сполученим полем. Тому, крім процесу релаксації до рівноважного стану протягом часу за участі 2-ох ступенів свободи, може реалізуватися автоколивальний режим, а за участі 3-ох можливий перехід у нестійкий стан. Стосовно складних систем, слід розуміти під основним процесом – цілеспрямовану поведінку й розвиток, а під дрібномасштабними флуктуаціями – випадкові відхилення, викликані, зокрема, взаємодією з технологічним середовищем. Листова заготовка являє собою збалансовану систему, внаслідок чого її властивості перебувають у взаємозв'язку. Деякі із взаємозв'язків властивостей очевидні та достатньо досліджені, інші не настільки очевидні й вимагають додаткових досліджень.

Загальновідомо, що листовий матеріал має значну анізотропію властивостей, що є наслідком кристалічної будови матеріалу й наступного його текстурування при прокатуванні [116]. Таку характеристику листового матеріалу необхідно враховувати. В свою чергу, численні дані про деформування анізотропних матеріалів показують, що, на відміну від однозначної поведінки ізотропного середовища, при штампуванні анізотропних заготовок суттєво підвищуються деформаційні можливості матеріалу й конкретні характеристики виробів у певних напрямках. Тому одним з перспективних шляхів поліпшення якості виробів і підвищення деформаційних властивостей напівфабрикатів для різних операцій штампування є формування в листовому матеріалі заздалегідь заданої анізотропії властивостей. Для реалізації цього необхідно знати величину показників анізотропії, методи опису текстурної морфології. Крім того, має бути сформоване оптимальне технологічне середовище, яке у свою чергу буде формувати оптимальні властивості виробів.

У зв'язку із цим ефективне використання природної анізотропії кристалічних матеріалів приводить до вдосконалення технологічного середовища. У результаті можуть утворюватися додаткові зв'язки між елементами системи. Збільшення багатозв'язковості, наприклад, між зернами матеріалу, приводить, в остаточному підсумку, до досить істотної їхньої морфологічної перебудови. Принциповою відмінністю системи зерен від

системи атомів у кристалі є самостійність інформації і її вплив на морфологію текстури листового матеріалу.

У результаті система зерен матеріалу закріплює свою змінену морфологію. Вихідний гомогенний, на рівні підсистем вищого рівня, елементний склад може стати гетерогенним, зберігши або не зберігши гомогенність на рівні підсистем більш низького рівня. Це є наслідком функціональної діяльності, тобто морфологічному перетворенню передує нагромадження циркулюючої інформації, цілеспрямоване її наростання і як наслідок спрямоване орієнтування властивостей матеріалу [117].

Однак схема таких технологічних структур відбувається при дискретних значеннях керуючого параметра технологічного середовища практично на границі втрати стійкості. В цьому випадку значення керуючого параметра є біфуркаційним, а явище називається ***біфуркацією***. Біфуркація може виникнути як за наявності технологічного впливу, так і при зупиненні його дії. Тому розвиток системи в часі відбувається в певному атракторі [118, 119].

Після виникнення біфуркації що-небудь певне про постбіфуркаційний період сказати важко й такий стан системи принципово не передбачений, але можна говорити про тенденції еволюції системи. Таким чином, є способи для зведення «бар'єрів» у ході технологічного спадкування. Суть цього способу полягає у створенні самоорганізаційних систем.

Механізм передачі властивостей виробів з однієї технологічної операції до іншої ще не розкритий належним чином. Що стосується якісної характеристики фазового простору, тобто його топологічної структури, то вона зазнає різких змін при дискретних значеннях параметра. У цьому проявляється унікальність поведінки складних систем, яку можна представити, говорячи сучасною мовою, креативною тріадою. У синергетиці креативна тріада представлена як процес самоорганізації, народження параметрів порядку й упорядкованих структур мезорівня з хаосу мікрорівня. У точці біфуркації мезорівень зникає й виникає прямий контакт, що породжує мезорівень із іншими якостями. Нарешті, ще одним фактором перетворень морфології на мезорівні є функціонально генеровані поля технологічних середовищ. Взаємодії речовини з фізичними полями ще слабко вивчені, а методи опису полів, що дають можливість одержати чисельні результати, далеко неадекватні. Передбачити результати технологічного впливу на морфологію вдається для обмеженого класу задач.

З урахуванням з вищесказаного, вибір концепції спрямованого формування властивостей, штампованих деталей з листового матеріалу повинен об'єднати феноменологічний, синергетичний і кристалографічний підходи, а також розглядати наступну креативну тріаду системи; мікрорівень (кристалічна структура), мезорівень (зерниста структура) і макрорівень (властивості матеріалу й середовищ). Це означає перекриття різних ієрархічних рівнів на одному масштабі дослідження та застосування детермінованого й стохастичного підходів при системному аналізі спрямованого формування властивостей виробів. Для обґрунтування підходу спрямованого формування властивостей листових заготовок у процесі прокатування, насамперед треба

з’ясувати – які комбінації показників анізотропії відповідають вимогам до вдосконалення конкретних листоштампувальних операцій.

У зв’язку з вищевикладеним, у процесі еволюції матеріалу, що деформується, виникає низка нестійких структур, що дозволяє керувати текстурною морфологією. Керуючими параметрами в цих процесах є тиск валків і температура нагрівання. Для цього необхідно одержати моделі взаємозв’язку показників анізотропії листового матеріалу з характеристиками текстури й константами кристалічних решіток. Це дозволить, з одного боку, встановити для конкретних умов деформування раціональні значення показників анізотропії, а з іншого – маючи їх функціональні зв’язки з характеристиками текстури, забезпечити одержання в матеріалі необхідної спрямованості властивостей.

Як ми вже відзначали, фізичною основою анізотропії властивостей металів є текстура, формування параметрів якої визначається безліччю факторів, основними з яких є тип кристалічних решіток, умови та схеми деформації, режими термічної обробки.

Однак цілеспрямовано скористатися зазначеними вище даними про текстуру металів украй важко. Це зумовлено насамперед тим, що параметри текстури не пов’язані кількісними співвідношеннями з показниками анізотропії. Природним виходом із цієї ситуації є використання феноменологічного підходу. При такому підході полікристалічні тіла розглядають як однорідні матеріали, показники анізотропії котрих описують тензорними величинами, а орієнтацій-ні фактори текстури – через напрямні косинуси переважних кристалографічних напрямків.

Інакше кажучи, можна поєднати макроскопічний підхід до процесів деформації й макроскопічний підхід до процесів текстуроутворення за рахунок переважної орієнтації кристалографічних напрямків у полікристалічному тілі з урахуванням локалізації пластичної деформації.

Аналіз переважних кристалографічних напрямків здійснюється, як правило, шляхом побудови прямих і зворотних полюсних фігур після різних режимів обробки.

Крім цього, останнім часом усе більш значне поширення одержав кількісний опис текстур за допомогою імовірнісних функцій розподілу зерен по орієнтаціях. В основі побудови цих функцій лежить аналітичне уявлення орієнтації кристалографічних осей кристалів відносно осей текстурованого листового матеріалу за допомогою кутів Ейлера. Впорядкування текстурної морфології приведе до збільшення або зменшення щільності кутів Ейлера для певних орієнтацій. Ця зміна враховується за допомогою спеціальної текстурної функції, названої вище як імовірнісна функція розподілу зерен по орієнтаціях.

Функція показує, у скільки разів змінюється питомий об’єм матеріалу, зайнятий даним орієнтуванням, у порівнянні з питомим об’ємом цього ж орієнтування в ізотропному матеріалі. При описі переважних орієнтувань із урахуванням симетрії кристалів використовують розкладання функцій по симетричних узагальнених сферичних складових.

Текстурні функції дають повну інформацію про розподіл переважних кристалографічних напрямків у листовому матеріалі. Вони добре зарекомендували себе, наприклад, при розрахунках анізотропії пружних властивостей полікристалів. При цьому функція дозволяє визначити значення конкретної властивості в будь-якому напрямку текстурованого листового матеріалу, якщо відома анізотропія цієї властивості в монокристалі.

У цілому припущення про технологічне спадкування властивостей основані на аналізі функції розподілу зерен по орієнтаціях і на результатах одержання необхідних текстур конкретних листових матеріалів на окремих етапах їх обробки. Прикладом цьому можуть бути стабільні й нестабільні орієнтування при прокатуванні банкової стрічки. Це поставило вимогу до проведення спеціальних досліджень режимів нагрівання злитків перед гарячим прокатуванням, його температурно-швидкісних параметрів і створення принципово нових процесів високошвидкісного холодного прокатування. Прокатування з більшими обтисненнями й швидкостями деформації забезпечує не тільки одержання гомогенного стану матеріалу, але й дрібнозернистої рекристалізованої структури зі цілеспрямованими властивостями.

РОЗДІЛ 9

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ

9.1 Методи, що підвищують працездатність деталей робочих органів машин

Найпоширенішою причиною порушення працездатності деталей робочих органів машин є не поломка, а знос та ушкодження їх робочих поверхонь.

Якість поверхні – це геометрична характеристика й фізико-механічні властивості поверхневого шару деталей (структура шару, мікротвердість і наявність залишкових напружень).

Для підвищення довговічності й несучої здатності застосовують загартування струмами високої частоти (СВЧ), нанесення гальванопокриттів, азотування, алітування, іонно-плазмові й детонаційно-газові покриття, а також поверхневе пластичне деформування (ППД) тощо.

Існують такі ***види зносу*** – адгезійний, абразивний, дифузійний, окисний.

Одним зі шляхів підвищення конкурентоспроможності деталей є поліпшення якості поверхневого шару і зниження вартості ремонту машин, а саме можливість багаторазового відновлення форми деталей зміцнюючими покриттями й забезпечення їх взаємозамінності.

Для підвищення довговічності взаємодіючих деталей (таблиця 9.1) застосовують різні технологічні способи їх зміцнення. До них належать: термічна, хіміко-термічна, фізико-хімічна обробка робочих поверхонь деталей, поверхневе пластичне деформування, гальванічні покриття, металізація напилюванням і наплавлення поверхонь, електроерозійне легування (ЕЕЛ) тощо.

Основним завданням застосовуваних методів є підвищення якісних параметрів поверхневого шару: підвищення твердості та мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості й відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знака залишкових напружень, збільшення втомної міцності тощо.

З метою одержання високої твердості в поверхневому шарі деталі зі збереженням в'язкої серцевини, що забезпечує захисні властивості поверхні з механічною міцністю основи, застосовують поверхневе загартування або хіміко-термічну обробку.

Поверхневе загартування відрізняється від хіміко-термічної обробки меншою тривалістю процесу. Існує кілька методів поверхневого загартування (у розплавлених металах або солях, полум'яне загартування, електрострумом високої частоти), однак усі вони полягають у нагріванні тільки поверхневого шару з наступним загартуванням деталі. На практиці найбільш широке застосування дістав останній спосіб (***високочастотне загартування***) при нагріванні поверхневого шару деталі змінним струмом високої частоти (СВЧ).

Таблиця 9.1 – Класифікація деяких виробів, для яких актуальне керування якістю поверхневих шарів, їх елементів і вимог до цих елементів

Назва групи виробів	Основні вимоги до виробів	Поверхні виробів	Основні вимоги до відповідальних поверхонь виробів
1	2	3	4
Деталі типу валів, осей, колінчастих валів	Висока міцність і опір утомним руйнуванням	Шийки під підшипники ковзання	Висока мікротвердість і стійкість проти окислювального і корозійно-абразивного зносу, низька шорсткість
		Шийки під посадочні місця	Висока мікротвердість, стійкість проти фретинг-корозії, низька шорсткість
Деталі, що піддаються високим питомим навантаженням: штоки, пуансони, валки прокатних станів тощо	Висока міцність, опір утомним руйнуванням і високим питомим навантаженням	Зовнішні циліндричні поверхні, що зазнають зносу	Висока мікротвердість, стійкість проти окислювально-абразивного зносу, низька шорсткість
Деталі, що піддаються торцевому тертю: імпульсні торцеві ущільнення, підп’ятники і т. п.	Відсутність жолоблення в умовах змінних навантажень і високих температурних напружень	Плоска робоча поверхня	Висока мікротвердість, стійкість проти окислювально-абразивного зносу, низька шорсткість
		Криволінійний поясок	Низька мікротвердість
Робочі колеса компресорів, машин для дуття, насосів тощо	Відсутність працездатності в умовах високих статичних і динамічних навантажень	Криволінійна ділянка лопатки на вході й виході та прилягаючі до неї плоскі ділянки основного диску	Стійкість проти ерозійного зносу і хімічної корозії

Продовження таблиці 9.1

1	2	3	4
Металорізальний інструмент: різці, свердла, кінцеві й дискові фрези, пилки Геллера та ін.	Висока міцність		Висока мікро-твердість, стійкість проти окислювально-абразивного, адгезій-ного, дифузійного та інших видів зносу, низька шорсткість

Основні **переваги методу**:

− можливість контролювати глибину загартованого шару від часток міліметра до 10 мм і більше;

− мінімальне жолоблення;

− висока продуктивність.

Загартування СВЧ застосовується тільки в масовому і крупносерійному виробництві через високу вартість обладнання й відпрацьовування технології [120].

Одним з напрямків збільшення опору тертю та зношуванню деталей є створення на їх поверхневих шарах хімічних сполук, властивості яких відрізняються від властивостей основних металів. До такої категорії методів підвищення зносостійкості металів відносять хіміко-термічна обробку, при якій на поверхні металів утворюються з’єднання з вуглецем, азотом, сіркою й іншими хімічними елементами з V, VI, VII груп періодичної системи Д.І. Менделєєва.

Ці методи обробки, що дістали назву: цементація, азотування, ціанування, борування, хромування й низку інших – останнім часом знаходять застосування в машинобудуванні переважно для поліпшення протизадирних і антифрикційних якостей тих деталей машин, які працюють у тяжких умовах тертя, коли є небезпека заїдання.

При ***цементації***, у результаті насичення поверхневого шару виробів вуглецем, утворюється високовуглецевий шар. Застосовують, як правило, низьковуглецеву сталь (до 0,3% С) і потім піддають загартуванню. У результаті утворюється твердий поверхневий шар (0,5–2,5 мм) і м’яка серцевина [121].

Розрізняють, залежно від середовища, цементацію у твердому, газоподібному й рідкому карбюризаторах. Температура процесу досягає 900-950°С.

Основний недолік цементації – це те, що в результаті процесу в поверхневому цементованому шарі виникають напруження стискання, а в серцевині – напруження розтягання. У результаті залишкові напруження приводять до значної деформації виробів.

Азотуванням називають дифузійне насичення азотом поверхонь сталевих і титанових деталей. Після азотування деталі незначно збільшуються в розмірах. Процес азотування проводять при температурі 500-600°С на готових деталях, що пройшли остаточну термообробку, і доводять до остаточного

розміру поліруванням або шліфуванням. З легуючими елементами деталей (хромом, молібденом, ванадієм і алюмінієм) азот утворює тверді й стійкі нітриди. Найбільшу твердість азотованому шару надає легуючий елемент деталей – алюміній.

Азотування проводять у шахтній електричній печі опору з герметичним муфелем з жаростійкої сталі, обладнаній вентилятором і трубами введення й виведення газів. Тривалість витримки залежно від необхідної глибини шару й температури процесу задають із розрахунку 15 год. на 0,1 мм азотованого шару.

У результаті наявності в азотованому шарі залишкових напружень стискання границя витривалості деталей значно підвищується, причому опір утоми тим вищий, чим товстіший азотований шар.

Азотуванню піддають вироби, від яких потрібна висока зносостійкість і мікротвердість поверхневого шару, підвищена циклічна міцність, а також стійкість до корозії.

У порівнянні із цементацією і загартуванням процес азотування проходить при більш низькій температурі; азотована поверхня має вищу твердість, зносо-та корозійну стійкість, кращу здатність до полірування; властивості азотованої поверхні зберігаються практично незмінними при повторних нагріваннях аж до 500-600°С, у той час як при нагріванні цементованої й загартованої поверхні до 225-275 °С твердість її знижується [122].

Останнім часом значного поширення набув процес азотування іонізованим азотом у плазмі тліючого розряду – ***іонне азотування (ІА)***. Спосіб ІА полягає в обробці деталі або інструмента потоком іонів азоту. У результаті останні проникають на контрольовану глибину до 1 мм.

Процес зміцнення проводять на установках ІА з використанням реакційного газу – дисоційованого аміаку. Установка може бути обладнана пристроєм для ІА внутрішніх поверхонь втулок, гільз тощо з використанням додаткового анода. Поверхні наскрізних отворів (3 мм) і пазів (3 мм) зміцнюються в процесі ІА.

ІА проводять у розрідженій азотовмісній атмосфері з підключенням виробів, що азотуються, до негативного електрода (катода). Анодом є контейнер установки (печі). Між катодом і анодом збуджується тліючий розряд. Іони газу, бомбардуючи поверхню виробу, нагрівають її до температури насичення. Потім через камеру прокачують суміш азоту з воднем.

Дотримання технологічного процесу забезпечує мінімальні поводки, що легко усуваються чистовим шліфуванням, деформація незначна й становить 10 мкм на сторону.

Наприклад, при ІА штоків АГНКС RB – 250 за чистовими розмірами ∅32 мм і довжиною 644 і 680 мм відповідно зі сталей 38Х2МЮА і 40ХН2МА, розмір діаметрів штоків після ІА збільшився на 0,01-0,015 мм і перебував у межах допуску. Биття після ІА становило 0,01-0,02 мм, що відповідає вимогам креслення.

Переваги ІА в порівнянні зі звичайним рідинним і газовим азотуванням полягають у можливості цілеспрямованого контролю структури одержуваного поверхневого шару, застосуванні відносно низьких температур (до 500°С),

відсутності поводок та жолоблення, виключенні насичення воднем й запобіганні розвитку процесів відпускної крихкості в основному металі, нешкідливості й екологічної безпеки процесу, скороченні тривалості обробки.

Тривалість ІА коливається від 0,5–36 год. залежно від необхідної глибини зміцненого шару. В таблиці 9.2 показано режими й основні параметри якості сформованих поверхневих шарів після ІА.

Таблиця 9.2 – Режими і результати іонного азотування типових деталей із різних сталей, чавуну

Матеріал деталі	Тем-пера-тура, °С	Час, год.	Мікро-твердість, МПа	Глибина шару, мкм	Залишкові напру-ження, МПа	Типові деталі
40Х13	520	10	11000	140	-450	Пресформи, клапани та ін.
Х12	480	1-2	12000	15-20	-300	Формоутворюючі пресформи
32Х2МЮА	530	5-6	10500	280	-400	Штоки, гільзи, втулки та ін.
40Х	520	4-5	5500	200	-350	Вали, зубчасті колеса та ін.
40ХФА	520	4-5	6000	200	-350	Плунжери, втулки
18Х2Н4МА	550	7	6500	350	-450	Колінчасті вали, шатуни
18ХГТ	550	3-4	5500-6000	200	-350	Шестерні
12Х18Н10Т	560	5	10000	170	-200	Деталі арматури, клапани та ін.
Р6М5	520	0,5-0,7	13500	25	-200	Інструмент перервного різання
	520	1,0-1,5	13000	40	-200	Інструмент неперервного різання
Сірий чавун	550	8	5000	200	Не змінюється	Пресформи, колін вали, розподільні вали та ін.
Титановий сплав ВТ1-0	775	24	4500	500	-300	Ножі центрифуг

Під ***ціануванням*** розуміють процес одночасного насичення сталі вуглецем і азотом. Розрізняють тверде, рідке й газове ціанування.

На склад та властивості зміцненого шару досить сильно впливає температура ціанування. При високій температурі процес більше нагадує цементацію, а при низькій – азотування. Ціанування розділяють на високотемпературне при 800-950°С і низькотемпературне при 500-600°С.

У порівнянні із цементованим, ціанований шар має більш високий опір зносу, більшу твердість та опір корозії.

Низькотемпературне рідке ціанування набуло значного поширення для підвищення стійкості різального інструменту зі швидкорізальної сталі. У результаті на поверхні виникає тонкий (10-15 мкм) карбідонітридний шар, що має добрий опір зносу та є менш крихким, ніж чисті карбіди й нітриди.

Високотемпературному рідинному ціануванню піддають деталі (болти, гайки, ролики, зубчасті колеса тощо) із середньо-, низько- і звичайних вуглецевих та легованих сталей. Глибина шару становить 0,05-0,25 мм.

Газове ціанування, або нітроцементація, проводиться в газовому середовищі, яке складається із цементуючого й нітруючого газів. Глибина ціанованого шару за час витримки до 8 год. становить до 2 мм.

Борування – процес дифузійного насичення поверхні металу з'єднаннями бору у вигляді боридів заліза Fe_2B і FeB. Застосовують для підвищення зносостійкості й червоностійкості виробів, у тому числі працюючих при підвищених або знижених температурах, знакозмінних й ударних навантаженнях або в агресивних та абразивних середовищах. Боруванню можуть піддаватися будь-які марки сталей, його проводять у суміші борвмісних порошків, паст, газів або в розплаві солей.

Борування переважно використовують для зміцнення металевих поверхонь, що працюють на стирання: металорізальних інструментів зі швидкорізальних сталей, штампового інструмента, прес-форм, деталей дробильних машин, жолобів грохотів, башмаків коксовиштовхувачів і деталей, що працюють при 500-800°С. Борування доцільно проводити у вакуумних печах або в печах із захисною атмосферою. У результаті борування можлива зміна розмірів деталі.

Процес дифузійного хромування може використовуватися для підвищення жаро-, зносо-, кавітаційної й корозійної стійкості деталей машин та інструмента у машинобудівній, хімічній, приладобудівній й інших галузях промисловості. Хромовані вироби мають підвищену окалиностійкість до температури 800°С. Процес хромування можна виконувати для будь-яких марок сталей. Твердість хромованого шару підвищується зі збільшення вмісту вуглецю і може досягати HV 1300 при глибині шару до 0,3 мм.

Термодифузійне хромування сталі у поєднанні з її термообробкою застосовують при виготовленні втулок, штоків, деталей клапанів та інших деталей, що працюють при температурі 580 °С і вище, для захисту від корозії, ерозії й задирів. Недоліком методу є: мала товщина шару при великій тривалості та складності процесу, жолоблення деталей.

Процес насичення поверхневих шарів металу сіркою називають ***сульфідуванням***. Розрізняють низько-, середньо- і високотемпературне сульфідування, яке проводять у рідкому, твердому й газовому сірковмісному середовищах. Сульфідуванню піддають технологічне оснащення, виготовлене зі швидкорізальної сталі, та сталей типу ХВГ, 9ХС. Найбільша товщина шару досягається при середньотемпературному сульфідуванні 0,04 мм.

Різновидом сульфідування є ***сульфоціанування***, при якому відбувається насичення поверхні феросплаву сіркою, азотом і вуглецем. Глибина шару при середньотемпературному сульфоціануванні (540-580°С) близько 0,04 мм, а при високотемпературному (850-950°С) глибина дифузії сірки досягає 1 мм. Ефективність сульфідування полягає у тому, що сульфідна плівка, яка має меншу міцність, ніж основний метал, легко руйнується при терті й відділяється від основи, запобігаючи схоплюванню поверхонь тертя. У процесі зношування сірка дифундує вглиб металу з тим більшою інтенсивністю, чим вищий тиск у парі тертя. Таким чином, антифрикційні властивості, притаманні сульфідному шару, зберігаються при величині зносу, що значно перевершує первісну товщину шару [122].

Низькотемпературне рідинне ціанування набуло значного поширення для підвищення стійкості різального інструменту зі швидкорізальної сталі. У результаті на поверхні виникає тонкий (10-15 мкм) карбідонітридний шар, який має добрий опір зносу й менш крихкий, ніж чисті карбіди та нітриди.

Сульфідуванню й сульфоціануванню піддають: поршні, втулки, поршневі кільця, сталеві підшипники ковзання, гайки ходових гвинтів, деталі рухливих частин, змазування яких ускладнено.

Недоліками методу є значне збільшення шорсткості поверхні й збільшення розмірів деталі. Крім того, сульфідування не може служити засобом захисту від корозії.

Одним із шляхів поліпшення якості поверхневого шару і зниження вартості ремонту машин є багаторазове відновлення форми деталей металопокриттями й забезпечення їх взаємозамінності. Метод нанесення металопокриттів можна підрозділити на наплавлення, гальванопокриття та металізацію напилюванням.

Наплавлення відрізняється від інших способів відновлення тим, що ним можна в широких межах змінювати хімічний склад шару, який наплавляється, а головне – необмежено нарощувати метал. Недоліками методу є: утворення тріщин, жолоблення, висока пористість, наявність шлакових включень, зниження втомної міцності й низка інших.

Гальванопокриття (хромування, нікелювання, залізнення й ін.) застосовують для деталей зі зносом від декількох мікрометрів до 1,5 мм.

Хромування, як процес відновлення й підвищення зносостійкості поверхонь тертя, займає одне з перших місць. Хромове покриття має високу твердість (НВ 450-1000), добру теплопровідність і зносостійкість. Недоліки методу: погана припрацьовуваність та змочуваність маслом, зниження опору втоми.

Металізація напилюванням полягає у розпиленні розплавленого металу струменем стисненого повітря й осадженні його на попередньо підготовлену поверхню деталі. Як матеріал, що на-пиляється, застосовують дріт зі сталі, бронзи, латуні, алюмінію й ін. Для кращого зчеплення часточок, що наносяться, з підкладкою збільшують шорсткість відновлюваної поверхні.

Незважаючи на те, що процес металізації напилюванням відрізняється простотою й продуктивністю, метод має істотні недоліки: висока пористість (до

10%), зниження опору втоми, слабке зчеплення матеріалу, який наноситься, з підкладкою, незадовільна робота в умовах тертя без змащення та ін. Застосовується для відновлення шийок валів, колінвалів, вкладишів підшипників і т. п.

Для зміцнення та нанесення захисних покриттів досить перспективним є ***метод електроерозійного легування*** (***ЕЕЛ***). Технологічна сутність ЕЕЛ полягає в перенесенні легуючого матеріалу анода на поверхні, що легується, при іскровому розряді в повітряному середовищі. Перенесений матеріал анода легує катод і, з'єднуючись хімічно з атомарним азотом повітря, вуглецем та матеріалом виробу, що зміцнюється, утворює на поверхні останнього дифузійний зносостійкий шар. Завдяки значній гамі металів, які можна використовувати при ЕЕЛ, цим методом у широких межах змінюють механічні, термічні, електричні, термоемісійні й інші властивості робочих поверхонь деталей.

До основних особливостей ЕЕЛ слід віднести:

− локальну обробку поверхні;

− високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою;

− відсутність нагрівання деталі в процесі обробки;

− можливість використання як обробні матеріали, як чистих металів, так і їх сплавів, металокерамічних композицій, тугоплавких з'єднань і т. п.;

− дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складовими елементами анода (електрода) без зміни розмірів деталі;

− відсутність необхідності спеціальної підготовки поверхні.

Необхідне обладнання малогабаритне, надійне й транспортабельне [123, 124].

Недоліками методу є: зниження шорсткості поверхні, виникнення в поверхневому шарі розтягувальних залишкових напружень, зниження втомної міцності.

Спосіб конденсованого іонного бомбардування (***КІБ***) реалізується за допомогою полум'яних прискорювачів і електродугових випарників, принцип дії яких оснований на єдиному методі генерації речовини. Електродугові випарники й полум'яні прискорювачі найбільш ефективні при роботі на тугоплавких матеріалах. У цьому випадкові ступінь іонізації полум'яного потоку близький до 100%.

Технологічна сутність КІБ полягає в полум'янохімічному синтезі речовини покриття поблизу поверхні, яка зміцнюється (або безпосередньо на ній), і конденсації на ній продуктів цього синтезу. Процес нанесення покриття методом КІБ можна умовно розділити на три стадії: перша – генерація плазми одного з компонентів покриття (металевого матеріалу); друга – чищення й активація поверхні, що покривається, потоком цієї плазми (іонне бомбардування) і третя – синтез за допомогою газу реагенту зносостійкого покриття й осадження його на поверхні, що зміцнюється [125].

Матеріал катода (матеріал, що напиляється) випаровується у вигляді високошвидкісних струменів (швидкість 1×106 см/с), що містять як заряджені,

так і нейтральні частки. Струмені являють собою полум’яні потоки атомів та іонів з високим ступенем іонізації.

Деталь (анод) поміщають на шляху полум’яних потоків. На неї подають негативний потенціал, що прискорює потік іонів. Вибиті з катода атоми розганяють до високих енергій. Вони з великою швидкістю бомбардують поверхню анода, очищають її, вкорінюються в кристалічні решітки поверхневого шару і, накопичуючись, утворюють на поверхні мікроплівку речовини, яка осаджується (конденсується).

Спосіб дозволяє утворювати металеві зносостійкі покриття, що складаються із хімічних сполук – карбідів, нітридів, оксидів, карбонітридів тугоплавких металів Ti, Mo, Cr, W, V тощо, а також багатошарові й багатоскладні (композиційні) покриття. Товщина покриття 5-20 мкм.

Переваги способу в порівнянні з методами хіміко-термічної обробки:

− можливість одержання на робочих поверхнях зносостійкого покриття високої мікротвердості (HV 2600-3800);

− вища продуктивність процесу: можливість проведення процесу при температурах, що не переривають температуру відпускання, раніше термооброблених виробів;

− значне підвищення зносо-, жаро- і корозійної стійкості покриттів.

Недоліки методу: можливість зміцнення виробів обмежена розмірами камери, мала товщина шарів, що наносяться, обмежує відновлення виробів.

Висока щільність виробу енергії, простота керування параметрами процесу, безконтактність і висока швидкість обробки, а також можливість передачі енергії на більші відстані є тими характеристиками лазерної обробки, які викликають до себе пильну увагу дослідників і технологів.

Лазерне термозміцнення поверхні деталі є перспективним процесом, що створюють низку можливостей підвищення експлуатаційних якостей деталей та інструмента. Метод оснований на використанні явища високошвидкісного розігріву металу під дією лазерного променя до температур, що перевищують температуру фазових перетворень A_{C1}, але нижче від температури плавлення й наступного високошвидкісного охолодження за рахунок відводу тепла з поверхні в основну масу металу [126].

При обробці променем лазера, як і при звичайному загартуванні, у поверхневому шарі утворюється мартенсит та залишковий аустеніт. Мікротвердість у зоні обробки підвищується за рахунок того, що в зоні швидкого нагрівання й охолодження утворюється більш дрібнозернистий мартенсит. Глибина зміцненого шару досягає 0,2 мм. Шорсткість після лазерної обробки не змінюється.

До переваг можна віднести: можливість високопродуктивного зміцнення локальних ділянок деталей у місцях їх інтенсивного зносу при невеликій глибині впливу і зі збереженням вихідних властивостей матеріалу в основному об’ємі; висока твердість обробленої лазерним випромінюванням поверхні деталі (приблизно на 20% вище твердості при термообробці за традиційною технологією) і зумовлена цим висока зносостійкість; можливість зміцнення важкодоступних ділянок деталей шляхом уведення променя лазера через вікна

й отвору; відсутність деформації деталі й можливість обробки без збільшення шорсткості, що створює можливість виключити фінішну обробку. Лазерною обробкою можна і знімати зміцнення деталі [127].

Недоліки методу: неможливість відновлення розмірів зношених ділянок виробів, низька продуктивність зміцнення великих площ поверхні, в окремих випадках необхідність у складному оснащенні.

Поверхневе пластичне деформування (***ППД***), основане на механічному методі вихідного зміцнення, виконується з метою підвищення опору втоми й твердості поверхневого шару металу і формування в ньому спрямованих внутрішніх напружень, переважно напружень стиску, а також регламентованого рельєфу мікронерівностей на поверхні.

Наклеп поверхневого шару металу сприяє підвищенню зносостійкості деталей, зменшує зминання й стирання поверхонь за наявності безпосереднього контакту і взаємне впровадження поверхневих шарів, що виникає при їх механічній та молекулярній взаємодії [128].

Серед різних способів ППД розрізняють: дробоструминну обробку, чеканення, поверхневе обкатування (розкочування) роликом і кулькою, вигладжування, віброобробка, зміцнююче точіння.

Способи механічного ППД деталей мають такі переваги перед іншими: мала трудомісткість, простота технології (не потрібні значні витрати на обладнання й оснащення), можливість зміцнення деталей будь-якої форми і розмірів, можливість зміни глибини зміцнення, досить висока твердість зміцнених шарів. Крім того, ППД можна створювати на поверхнях, які зміцнюються, спеціальні мікрорельєфи [128, 129].

Найбільш простими та ефективними методами оздоблювально-зміцнюючої обробки є обкатування кулькою (ОК), обкатування роликом (ОР) й алмазне вигладжування (АВ). При обробці незагартованих сплавів і сталей застосовують ОК та ОР, а для високоміцних загартованих сталей і сплавів більш ефективним є АВ [63].

Глибина поширення пластичної деформації при обкатуванні й вигладжуванні визначається тиском, механічними властивостями і структурою сталі. Крім того, глибина наклепу залежить від розміру контактної площі. Зі зростанням тиску глибина наклепаного шару зростає. При однакових тисках глибина проникнення ППД тим більше, чим нижча границя текучості матеріалу. При АВ, незважаючи на більш високий приріст поверхневої твердості, пластична деформація поширюється на меншу глибину та наклепаний шар у вигладжених зразків значно тонший, ніж в обкачаних. Глибина зміцненого ППД шару може досягати декількох міліметрів.

У результаті наклепу підвищуються всі характеристики опору металу деформації, знижується його пластичність і збільшується твердість.

Зміцнення металу в незагартованій сталі відбувається за рахунок структурних змін і змін структурних недосконалостей (щільності, якості й взаємодії дислокацій, кількості вакансій та ін.), дроблення блоків і появи мікронапружень. При зміцненні загартованих сталей, крім цього, відбувається

часткове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит та виділення дисперсних карбідних часток [130, 131].

Таким чином, слід зазначити, що в цей час існує велика кількість різних методів підвищення якості поверхневих шарів виробів, кожний з них має свої переваги й недоліки (таблиця 9.3).

Таблиця 9.3 – Переваги та недоліки технологічних способів підвищення якості поверхневих шарів виробів

Характеристика якості поверхневого шару	Назва методів підвищення якості поверхневого шару
1	2
Переваги	
Підвищення твердості	Загартування СВЧ, цементація, азотування, ІА, ціанування, борування, термодифузійне хромування, КІБ, ЛО, ППД, наплавлення, гальванопокриття, металізація, напилення, ЕЕЛ
Зниження твердості	ЛО, ЕЕЛ
Відсутність жолоблення	КІБ, ЛО, гальванопокриття, ЕЕЛ
Підвищення жаростійкості	Борування, ЕЕЛ
Підвищення зносостійкості	Загартування СВЧ, цементація, азотування, ІА, ціанування, борування, термодифузійне хромування, КІБ, ЛО, ППД, гальванопокриття, ЕЕЛ
Підвищення корозійної стійкості	Азотування, ІА, ціанування, термодифузійне хромування, КІБ, гальванопокриття, ЕЕЛ
Можливість зміцнення у локальних місцях	ЛО, ЕЕЛ
Можливість відновлення зносостійких поверхонь	Наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням, КІБ, ЕЕЛ
Можливість нанесення на поверхню, що зміцнюється, чистих металів, металокерамічних композицій, тугоплавких з’єднань і т. п.	ЕЕЛ, КІБ
Створення на робочій поверхні перехідних шарів певної шорсткості	ЕЕЛ
Підвищення втомної міцності	Загартування СВЧ, цементація, азотування, ІА, ціанування, борування, термодифузійне хромування, КІБ, ЛО, ППД
Зниження шорсткості	ЛО, ППД
Екологічна безпека	Загартування СВЧ, ІА, ЕЕЛ, КІБ, ЛО

Продовження таблиці 9.3

1	2
Недоліки	
Жолоблення	Загартування СВЧ, цементація, азотування, ІА, ціанування, борування, термодифузійне хромування, наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням
Збільшення шорсткості	Наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням, ЕЕЛ
Зниження втомної міцності	Наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням, ЕЕЛ
Неможливість зміцнення крупногабаритних деталей	КІБ, ЛО
Неможливість відновлення зношених поверхонь	Загартування СВЧ, цементація, азотування, ІА, ціанування, борування, термодифузійне хромування, ЛО
Підвищення екологічної безпеки	Цементація, азотування, ціанування, борування, термодифузійне хромування, наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням

Проведені дослідження дали можливість обґрунтовано з усіх розглянутих методів підвищення якості поверхневих шарів виробів виділити, як найбільш перспективний, метод ЕЕЛ. ЕЕЛ має практично всі переваги перерахованих вище методів, а в багатьох випадках перевершує їх.

Якість поверхневих шарів деталей та інструментів при електроерозійному легуванні (ЕЕЛ)

Метод ЕЕЛ розроблений Б.Р. Лазаренком та Н.І. Лазаренко одночасно з методом розмірної електроерозійної обробки [57, 132]. Процес ЕЕЛ починається зі зближення електрода-інструмента з деталлю, і при відстані між ними, рівній або меншій від пробивної, починається розвиток імпульсного розряду, який у більшості випадків триває й завершується при контакті електродів.

Метод ЕЕЛ є одним з найбільш простих і доступних з технологічної точки зору. Серед його переваг, таких, як локальність, мала витрата енергії, відсутність об’ємного нагрівання матеріалу, слід зазначити простоту автоматизації, «вбудовуваність» у технологічний процес виготовлення деталей і суміщення операцій [133].

Метод ЕЕЛ універсальний, він **використовується для**:

− підвищення твердості, корозійної стійкості, зносо- і жаро-стійкості;

− зниження здатності до схоплювання поверхонь при терті;

− відновлення розмірів інструмента, деталей машин і механізмів;

− проведення на оброблюваність поверхні мікрометалургійних процесів для утворення на ній необхідних хімічних сполук;

− створення на робочій поверхні перехідних шарів певної шорсткості;

− нанесення радіоактивних ізотопів;

− застосування в декоративному мистецтві й ін. [123, 124].

ЕЕЛ дає можливість змінювати фізико-механічні властивості робочих поверхонь сполучених деталей, тобто підвищувати їх зносостійкість, мікротвердість, жаростійкість, корозійну стійкість і т. д. ЕЕЛ застосовується для зміцнення таких швидкозношуваних деталей, як вали, осі, довговічність котрих значною мірою визначає термін служби машин. Широке застосування метод ЕЕЛ дістав для підвищення зносостійкості металорізального й штампового інструмента.

Для формування якісного ЕЕЛ поверхневого шару на виробах необхідне використання найбільш раціональних режимів їх легування [134]. У зв’язку із цим необхідне розроблення математичних моделей, що описують кореляцію основних технологічних параметрів поверхневого шару (приріст, шорсткість і мікротвердість) з енергетичними параметрами роботи установки ЕЕЛ.

Розглянемо деякі особливості методів зміни якості поверхневих шарів і можливість їх використання для формування якості поверхневих шарів деталей та інструментів (таблиця 9.4).

Таблиця 9.4 – Види технологічних процесів, що використовують у наш час для формування якості поверхневих шарів деталей та інструментів

Назва процесу	Товщина шару, що зміцнюється, мм	Товщина прирощеного шару, мм	Переваги	Недоліки	Типові деталі
1	2	3	4	5	6
Загартування струмами високої частоти (СВЧ)	0,05-10	-	Висока продуктивність, мінімальне жолоблення	Доцільно застосовувати в одиничному виробництві унаслідок високої вартості обладнання	Шийки валів, колінвалів, гільзи, шестерні тощо
Цементація	0,05-0,25	-	Можливість регулювання глибини шару	Значні деформації	Зубці коліс редукторів тощо

Продовження таблиці 9.4

1	2	3	4	5	6
Азотування	до 1,0	-	Висока твердість та зносостійкість шару	Збільшення розміру деталі, жолоблення	Штоки, поршні, пресформи тощо
Іонне азотування (ІА)	-	-	Мінімальні поводки, екологічна безпека	Незначні зміни розмірів деталі	Штоки, поршні тощо
Рідке ціанування	0,05-0,25	-	Підвищення межі витривалості, більша швидкість процесу в порівнянні із цементацією та азотуванням	Складність роботи з ціаністими солями, відсутність гнучкого регулювання ступеня насичення шару вуглецем і азотом	Болти, гайки, втулки, зубчасті колеса, ролики тощо
Газове ціанування	до 2,0	-	Вартість у два рази нижча, ніж рідке ціанування, більша швидкість процесу в порівнянні із цементацією та азотуванням	Поводки і жолоблення	Болти, гайки, втулки, зубчасті колеса, ролики тощо
Термодифузійне хромування	до 0,1	-	Висока корозійна стійкість на повітрі й у морській воді	Мала товщина шару, довша тривалість процесу, можливе жолоблення	Плунжери, втулки, форсунки тощо
Конденсоване іонне бомбардування (КІБ)	-	0,005-0,02	Нанесення зносо і корозійностійких покриттів	Мала товщина шарів, неможливість зміцнення крупногабаритних деталей	Металорізальний, штамповий інструмент, оснащення тощо

Продовження таблиці 9.4

1	2	3	4	5	6
Лазерна обробка (ЛО)	до 0,1	-	Можливість зміцнення у локальних місцях, підвищення твердості на 20%, відсутність деформації виробів	Утруднено зміцнення крупно-габаритних деталей	Металорі-зальний, штамповий інструмент, оснащення тощо
Поверхневе пластичне деформування (ППД)	до 10	-	Зниження шорсткості поверхні, підвищення твердості та втомної міцності	Відсутність можливості зміни хімічного складу поверхні	Шийки валів, осей, колінвалів, кулачки, втулки тощо
Наплавлення	-	Необме-жено	Можливість у широких межах змінювати хімічний склад поверхневого шару	Утворення тріщин, жолоблення, пористість, наявність шлакових уключень, зниження втомної міцності	Вали, осі, корпусні деталі тощо
Гальвано-покриття	-	до 1,5	Підвищення зносостійкості	Погана припрацьо-вуваність, зниження втомної міцності	Шийки валів, колін-валів, осей штока тощо
Металізація напилюванням	-	до 5	Можливість у широких межах змінювати хімічний склад поверхневого шару	Пористість до 10%, зниження втомної міцності, слабке зчеплення основного і переносного металу	Щоки валів, колінвалів, вкладиші підшипників

Продовження таблиці 9.4

1	2	3	4	5	6
Електро-ерозійне легування (ЕЕЛ)	0,005-3	0,002-1,5	Підвищення жаро-, зносо- та корозійної стійкості виробів, міцне з'єднання переносного й основного металу, відсутність поводок, можливість нанесення як чистих металів, так і їх сплавів, металокерамічних композицій тугоплавких з'єднань тощо, відновлення зношених поверхонь та зміцнення в локальних місцях, простота «вбудовуваності» у технологічний процес, малогабаритне, надійне і транспортабельне обладнання	Підвищення шорсткості, зниження втомної міцності, поява у поверхневому шарі розтягуючих залишкових напружень	Усі деталі, що вимагають як зміцнення, так і відновлення поверхонь

9.2 Комбіновані способи зміцнення поверхонь деталей

Багатошарові покриття за рахунок можливості одержання комплексу властивостей поверхні, наприклад, одночасне забезпечення зносостійкості й антифрикційних властивостей, є перспективним напрямом підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин [135, 136]. У цьому випадкові нижній шар чинить високий опір зносу, оскільки наноситься з відповідного твердого матеріалу, а верхній шар виконується з антифрикційного матеріалу. Відомі багатошарові покриття, які мають шар з металокераміки або твердого сплаву (ВК-6М, Т15К6, TiN, Al_2O_3, TiC й ін.) і шар антифрикційного матеріалу (міді, бронзи, латуні й т. п.).

У роботі [137] відзначено, що використання синергетичних властивостей навантажених поверхневих шарів дістало втілення в технологіях, які реалізуються за допомогою двох (дуплексні покриття) або навіть трьох (триплексні покриття) різних методів нанесення покриттів, що припадають один за одним у технологічному процесі. Такі комбіновані процеси набувають широкого застосування при формуванні зносостійких шарів на поверхні різального інструменту й деталей фрикційного контакту. Типовий приклад дуплексної технології – нанесення вакуумно-плазмових покриттів на попередньо азотовані сталі. Встановлено, що азотування з подальшим нанесенням покриттів TiN і (TiAl)N збільшує несучу здатність та стійкість до абразивного зношування. Покриття TiN/Ti(CN), нанесене на азотовану сталеву поверхню, дає змогу підвищити стійкість до ерозійного зношування. Визначено, що застосування дуплексної обробки знижує вірогідність пластичної деформації основи в умовах контактного навантаження й забезпечує таким чином навантажувальну здатність системи «основа – покриття».

Принцип багатошаровості може бути використано для підвищення міцнісних властивостей покриттів, зниження пористості, релаксації внутрішніх напружень. Багатошаровістю покриття збільшують його в'язкість і опір розтріскуванню. Відомо, що тонкі покриття мають, як правило, більшу щільність та міцність. Нанесення товстих покриттів майже завжди супроводжується появою значних напружень, грубозернистої структури, збільшеної пористості. Використання принципу багатошаровості дозволяє одержувати покриття потрібної товщини, які не мають зазначених недоліків. Нанесення шарів твердих, а значить, крихких матеріалів з в'язкими прошарками, забезпечує цілий комплекс корисних властивостей (зносостійкість і антифрикційні властивості, опір втомі й опір корозії). Нанесення багатошарових покриттів дає можливість одержувати дрібнозернисті покриття, локалізувати і заліковувати мікротріщини, знижувати залишкові напруження або формувати залишкові напруження стискання, керувати градієнтами твердості й залишкових напружень за глибиною покриття, знижувати теплові деформації та напруження на границі покриття з підкладкою й ін.

Як указувалося вище, несуча здатність поверхні, зокрема в жорстких умовах контактного навантаження, визначається комбінацією властивостей покриття й підкладки. Вплив підкладки особливо сильно проявляється у тонких покриттів, нанесених, наприклад, іонно-плазмовим способом. За наявності твердого покриття на м'якій підкладці в умовах тертя в основі під покриттям відбуваються деформаційні процеси, які приводять до відшарування покриття і його руйнування. Очевидно, що покриття повинно мати товщину, більшу від глибини поширення залишкових напружень, які здатні привести до деформаційних процесів у підкладці. Зі збільшенням твердості основи зона поширення пластичних деформацій зменшується. Відповідно зменшується й гранично припустима для заданого рівня навантажень товщина покриття.

Слід зазначити, що більшість способів нанесення покриттів номінально допускає одержання шарів необмеженої товщини. Однак дія низки факторів, таких, як зниження міцності зчеплення з основою й витривалості при

збільшенні товщини, обмежена швидкість нанесення деяких покриттів, погіршення структури, зростання пористості, приводить до того, що існує оптимальний для кожного виду покриття діапазон товщини.

Установлено, що комбінація електроіскрового легування (ЕІЛ) з поверхневим пластичним деформуванням (ППД) дає змогу досягти кращої якості поверхні, зменшуючи при цьому її шорсткість, і своєю чергою дозволить виключити з технологічного процесу операцію шліфування зміцненої поверхні або ж значно зменшити шар металу, що знімається при шліфуванні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Всеобщее управление качеством: учеб. для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров и др.; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1999. – 600 с.

2. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицын. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.

3. ИСО 8402:1994. Управление качеством и обеспечение качества. Словарь.

4. Корешков В.Н. Управление качеством и сертификация продукции / В.Н. Корешков, Н.А. Кусанин, М.Л. Хейфец. – Мн.: БелГИСС, Полоцк: ПГУ, 2000. – 64 с.

5. Качество машин: справ.: в 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.

6. Качество машин: справ.: в 2 т. Т. 2 / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.

7. Шухгальтер Л.Я. Управление качеством машин / Л.Я. Шухгальтер. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

8. Цейтлин В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справ. / В.И. Цейтлин, В.И. Волков, Н.Д. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.

9. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

10. Громаковский Г.Д. Система понятий и структура моделей изнашивания / Г.Д. Громаковский // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – № 1. – С. 53-62.

11. Азгальдов Г.Г. Количественная оценка качества продукции – квалиметрия / Г.Г. Азгальдов. – М.: Знание, 1986. – 118 с.

12. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 256 с.

13. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.

14. Хейфец М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.

15. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Мн.: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.

16. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов и др. – Новополоцк: ПГУ, 1996. – 136 с.

17. Ящерицын П.И. Работоспособность узлов трения машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 288 с.

18. Роботнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Роботнов. – М.: Наука, 1977. – 383 с.

19. Роботнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Роботнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

20. Кузьменко А.Г. Механика контактной среды при наличии ползучести и износа и метод конечных элементов / А.Г. Кузьменко. – Брянск: БИТМ, 1980. – 42 с.

21. Ящерицын П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – Мн.: Наука и техника, 1978. – 120 с.

22. Технологическая надежность станков / Под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Машиностроение, 1971. – 342 с.

23. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Под ред. А.М. Дальского. – М.: МАИ, 2000. – 364 с.

24. Технология конструкционных материалов / А.М. Дальский, Б.С. Гаврилюк, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

25. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидоркин, Г.Ф. Косолапов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

26. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

27. Шмитт-Томас К.Г. Металловедение для машиностроения: справ. / К.Г. Шмитт-Томас. – М.: Металлургия, 1995. – 512 с.

28. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / П.А. Биргер, Б.Ф. Балашов, И.С. Дуличев и др. М.: Машиностроение, 1981. – 222 с.

29. Кузнецов Н.Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

30. Archard J.F. Elastic Deformation and Laws of Friction // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1957. Vol. 243, № 12. P. 190-205.

31. Блашкович П. Влияние покрытий на трибологические процессы // Трение и износ. – 1992. – Т. 13 – № 1. – С. 59-62.

32. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

33. Гольштейн М.И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М.И. Гольштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1986. – 311 с.

34. Кудрин В.А. Технология получения качественной стали / В.А. Кудрин, В.А. Парма. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.

35. Дубров Н.Ф. Кипящая сталь / Н.Ф. Дубров, Е.М. Кривко. – М.: Металлургия, 1984. – 97 с.

36. Пекиринг Б.Ф. Физическое металловедение и разработка сталей / Б.Ф. Пекиринг. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.

37. Циммерман Р. Металлургия и материаловедение: справ. / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.

38. Армирование слитка в изложницах / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, Ю.А. Самойлович и др. // Сталь. – 1983. – № 5. – С. 38-39.

39. Высококачественные чугуны для отливок / Под ред. Н.Н. Александрова. – М.: Машиностроение, 1982. – 223 с.

40. Тихонов С.А. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении / С.А. Тихонов, С.А. Герасимов, И.И. Прохорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 79 с.

41. Эффект памяти формы в сплавах / Под ред. В.А. Займовского. – М.: Металлургия, 1979. – 451 с.

42. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.

43. Новиков И.И. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном / И.И. Новиков, В.К. Портной. – М.: Металлургия, 1980. – 167 с.

44. Гуляев А.П. Сверхпластичность сталей / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1982. – 52 с.

45. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. / Под ред. Ф.И. Квасова и И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.

46. Металловедение алюминиевых сплавов / Под ред. С.Т. Кишкина. – М.: Наука, 1985. 238 с.

47. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.

48. Магниевые сплавы: справ. – Т. 2. – М.: Металлургия, 1979. – 528 с.

49. Дриц М.Е. Развитие и перспективы использования магниевых сплавов в различных отраслях народного хозяйства / М.Е. Дриц // Металловедение легких сплавов. – М.: ВИЛС, 1985. – 109 с.

50. Применение титана в народном хозяйстве / Под ред. А.Т. Туманова. – Киев: Техника, 1975. – 199 с.

51. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 415 с.

52. Папиров И.И. Бериллий в сплавах: справ. / И.И. Папиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.

53. Бериллий. Наука и технология / Под ред. Д. Вебстера. – М.: Металлургия, 1984. – 624 с.

54. Жаропрочные сплавы для газовых турбин / Ч.Т. Симс, П.К. Феликс, Д.П. Уиттл и др. – М.: Металлургия, 1981. – 480 с.

55. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: справ. / С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1984. – 137 с.

56. Андриевский Р.А. Нитрид кремния и материалы на его основе / Р.А. Андриевский, И.И. Спивак. – М.: Металлургия, 1984. – 137 с.

57. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

58. Коррозия: справ. / Под ред. Л.Л. Шраера. – М.: Металлургия, 1981. – 630 с.
59. Кеше Г. Коррозия металлов / Г. Кеше. – М.: Металлургия, 1984. – 400 с.
60. Томашов Н.Д. Коррозия и коррозионно-стойкие сплавы / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова. – М.: Металлургия, 1973. – 232 с.
61. Розенфельд Н.Л. Коррозия и защита металлов / Н.Л. Розенфельд. – М.: Металлургия, 1970. – 448 с.
62. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, сплавов, металлов: справ. / Д.Г. Туфанов. – М.: Металлургия, 1982. – 350 с.
63. Крагельский И.В. Узлы трения машин: справ. / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
64. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
65. Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский и др. – Киев: Техника, 1975. – 408 с.
66. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
67. Обработка износостойких покрытий / Под общ. ред. Ж.А. Мрочека. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
68. Махонин А.И. Развитие порошковой металлургии / А.И. Махонин, М.Х. Шоршоров. – М.: Наука, 1988. – 77 с.
69. Волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. – М.: Наука, 1976. – 214 с.
70. Композиционные материалы: справ. / Под ред. Д.М. Карпиноса. – Киев: Наук. думка, 1985. – 592 с.
71. Технология машиностроения: в 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 1999. – 564 с.
72. Технология машиностроения: в 2 т. Т. 2. Производство машин / Под ред. Г.Н. Мельникова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 640 с.
73. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
74. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
75. Ящерицын П.И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П.И. Ящерицын. – Мн.: Высшая школа, 1974. – 328 с.
76. Мухин В.С. Модифицирование поверхностей деталей ГТД по условиям эксплуатации / В.С. Мухин, А.М. Смыслов, С.М. Боровский. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
77. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 175 с.

78. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
79. Теребушко О.И. Основы теории упругости и пластичности / О.И. Теребушко. – М.: Наука, 1984. – 380 с.
80. Ржаницын А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1963. – 416 с.
81. Кован В.М. Основы технологии машиностроения / В.М. Кован, В.С. Корсаков, А.Г. Косилова. – М.: Машиностроение, 1965. – 492 с.
82. Сборка и монтаж изделий машиностроения: справ.: Т. 1. – М.: Машиностроение, 1984. – 591 с.
83. Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М.П. Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
84. Дальский А.М. Сборка высокоточных соединений в машиностроении / А.М. Дальский, З.Г. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1984. – 304 с.
85. Скорынин Ю.В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость / Ю.В. Скорынин. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 159 с.
86. Кудрявцев В.Н. Детали машин / В.Н. Кудрявцев. – Л.: Машиностроение, 1980. – 464 с.
87. Петч Н.Д. Переход из вязкого состояния в хрупкое в α-железе / Автономный механизм разрушения: сб. науч. тр. – М.: Наука, 1963. – С. 69-83.
88. Гаркунов Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков. – М.: Транспорт, 1969. – 103 с.
89. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
90. Сигорский Б.П. Математический аппарат инженера / Б.П. Сигорский. – Киев: Техника, 1977. – 768 с.
91. Седякин Н.М. Об одном физическом принципе теории надежности / Н.М. Седякин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1966. – № 3. – С. 80-87.
92. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
93. Билик Ш.М. Макрогеометрия деталей машин / Ш.М. Билик. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
94. Дальский А.М. Технологическое наследование и направленное формирование эксплуатационных свойств изделий машиностроения / А.М. Дальский, А.С. Васильев, А.И. Кондаков // Известия вузов. Машиностроение. – 1996. – № 10–12. – С. 70-76.
95. Кондаков А.И. Проектирование маршрутов изготовления деталей с учетом технологического наследования / А.И. Кондаков, А.С. Васильев // Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 10–12. – С. 31-41.
96. Карпусь А.Н. Автоматизированное проектирование обработки деталей с покрытиями / А.Н. Карпусь, С.А. Клименко // Современные технологии упрочнения, восстановления и механической обработки деталей с покрытиями:

Тез. докл. науч.-техн. конф., ноябрь 1993, Киев: Об-во «Знание» Украины, 1993. – С. 69.

97. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В.Ю. Блюменштейн, В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

98. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

99. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / Под общ. ред. А.Г. Братухина. – Киев: Техника, 2001. – 728 с.

100. Окулесский В.А. Функциональное моделирование – методологическая основа реализации процессного подхода / В.А. Окулесский. – М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2001. – 280 с.

101. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

102. Суслов А.Г. Инженерия поверхностного слоя / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

103. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин и др.; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 109 с.

104. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.

105. Маклаков С.В. Моделирование бизнес-процессов с BPwin 4.0. – М.: ДиалогМИФИ, 2002. – 224 с.

106. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием / В.Ю. Блюменштейн // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Брянской государственной инженерно-технологической академии. – 2006. – Вып. 6. – С. 7-9.

107. Григорьева Н.С. Повышение качества изделий при технологической наследственности и самоорганизации процессов / Н.С. Григорьева, В.В. Божидарник, В.А. Шабайкович // Научные заметки: сб. науч. тр. Луцкого гос. техн. ун-та. – Вып. 20. – Т. 1. – С. 115-119.

108. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 640 с., ил.

109. Машиностроение. Энциклопедия. Технология сборки в машиностроении / А.А. Гусев и др.; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. III-5. – 640 с.

110. Божидарнік В.В. Технологія виготовлення деталей: навч. посіб. / В.В. Божидарнік, Н.С. Григор’єва, В.А. Шабайкович. – Луцьк: Надстир’я, 2006. – 612 с.

111. Божидарнік В.В. Автоматичне складання виробів: навч. посіб. / В.В. Божидарнік, Н.С. Григор'єва, В.А. Шабайкович. – Луцьк: Надстир'я, 2005. – 386 с.

112. Мирошин И.В. Методика проектирования упрочняющего технологического процесса с учетом явления технологического наследования / И.В. Мирошин, Д.А. Малышкин // Ползуновский вестник. – 2012. – Вып. 1/1. – С. 204-205.

113. Бондарчук В.И. Технологическое наследование при штамповке листовых материалов / В.И. Бондарчук // Студенческая весна 2008: Машиностроительные технологии: материалы Всероссийской научно-техн. конф., посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ – 2008. – С. 28-31.

114. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 400 с.

115. Баланкин А.С. Синергетика деформируемого тела / А.С. Баланкин. – М.: МО СССР, 1991. – 404 с.

116. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов / Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.

117. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогаев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

118. Васильев А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золотаревский, А.И. Кондаков; под общ. ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2003. – 352 с.

119. Никифоров А.Д. Процессы управления объектами машиностроения / А.Д. Никифоров, А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров. – М.: Высшая школа, 2001. – 445 с.

120. Солнцев Л.А. Пути повышения качества защитных покрытий на изделиях из стали и чугуна / Л.А. Солнцев // Технология и организация производства. – 1990. – № 2. – С. 12-14.

121. Толок В.Т. Разработка и внедрение новых методов вакуум-плазменной технологии высоких энергий / В.Т. Толок, В.Г. Падалка // Изв. АН СССР. – 1972. – № 4. – С. 40-41.

122. Авдеев В.Н. Технология и выбор способа материалопокрытия / В.Н. Авдеев. – Ташкент: Мехнат, 1990. – 272 с.

123. Синельников А.К. Вакуумное нанесение износостойкого покрытия на режущий инструмент / А.К. Синельников, А.Г. Гаврилов // Технологическая конструкция. – М.: Наука, 1983.

124. Методы повышения долговечности деталей машин / В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, В.Д. Власенко и др. – М.: Машгиз, 1971. – 273 с.

125. Харченко А.С. Влияние примеси фосфора на кинетику роста эпитаксиальных слоев / А.С. Харченко, О.М. Лютович. – Ташкент: ФИНТ, 1970. – С. 41-43.

126. Зенкін М.А. Моделювання технологічного процесу детонаційного нанесення покриттів / М.А. Зенкін, В.В. Єрмолаєв, Шишаки Моамун Бено // Вісник технологічного ун-ту. – Поділля, 2000. – № 3. – С. 45-49.

127. Костецкий Б.И. Задачи трибологии в машиностроении / Б.И. Костецкий // Вестник машиностроения. – 1989. – № 9. – С. 9-15.

128. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1976. – 292 с.

129. Котов О.К. Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами / О.К. Котов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1969. – 344 с.

130. Кривов Г.А. Технология самолетостроительного производства / Г.А. Кривов. – К.: КВІЦ, 1997. – 460 с.

131. Кузнецов І.Б. Фізико-хімічні основи створення покриттів: навч. посіб. / І.Б. Кузнецов, В.М. Пащенко. – К.: НМЦ ВО, 1999. – 176 с.

132. Кузнецов І.Б. Методика та апаратурне забезпечення оцінки якості високонавантажених деталей і вузлів виробів машинобудування / І.Б. Кузнецов, М.А. Зенкін, Маамун Бакір Шишані // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – 1999. – № 13–14. – С. 44-47.

133. Лахтин Ю.М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.

134. Високоефективна технологія зміцнення поверхні конструктивних елементів / В. Каплун, І. Пастух, Л. Сіліна, П. Каплун, М. Зенкін // Інформатизація та нові технології. – 1995. – № 2. – С. 26-27.

135. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворустин. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.

136. Лященко Б.А. Збільшення ресурсних показників через застосування енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення / Б.А. Лященко, О.В. Редько, А.К. Скуратовський // Наукові вісті НТТУ КПІ. – 2010. – № 1. – С. 115-119.

137. Сорока О.Б. Напружено-деформований стан дуплексних покриттів на штамповому інструменті / О.Б. Сорока, В.А. Тітов, Б.А. Лященко, О.В. Герасимова // Вісник НТТУ КПІ, Машинобудування. – 2001. – Вип. 67. – С. 85-87.

АЛФАВІТНО-ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

Фролов Євгеній Андрійович
Кравченко Сергій Іванович
Попов Станіслав Вячеславович
Гнітько Сергій Михайлович

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Редактор С.В. Попов
Комп’ютерна верстка С.В. Попов

Оригінал-макет виготовлено
на кафедрі технології машинобудування
Навчально-наукового інституту
інформаційних технологій та механотроніки
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка

Підписано до друку 10.01.2019 р. Формат 60×84/16
Папір офсетний. Гарнітура Таймс Нью Роман. Друк цифровий.
Умов. друк. арк. 12,75. Тираж 300 прим. Замов. № 01м-2019.
Ціна договірна.

Видавництво та друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи ДК № 4452 від 10.12.2012
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача, 4